

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-99711

(P2000-99711A)

(43) 公開日 平成12年4月7日(2000.4.7)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	デコード*(参考)
G 0 6 T 1/00		G 0 6 F 15/84	3 2 0 P
G 0 6 F 17/17		15/353	
H 0 4 N 1/19		H 0 4 N 1/04	1 0 2

審査請求 未請求 請求項の数1 OL (全 41 頁)

(21) 出願番号 特願平11-249539

(22) 出願日 平成11年9月3日(1999.9.3)

(31) 優先権主張番号 1 5 3 6 3 9

(32) 優先日 平成10年9月15日(1998.9.15)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 398038580

ヒューレット・パカード・カンパニー

HEWLETT-PACKARD COM
PANYアメリカ合衆国カリフォルニア州パロアル
ト ハノーバー・ストリート 3000(72) 発明者 レイモンド・ジー・ビュソレイル・ジュ
ニアアメリカ合衆国98052-2180ワシントン州
レッドモンド、175ブレイス・ノース・イ
ースト 3837

(74) 代理人 100081721

弁理士 岡田 次生

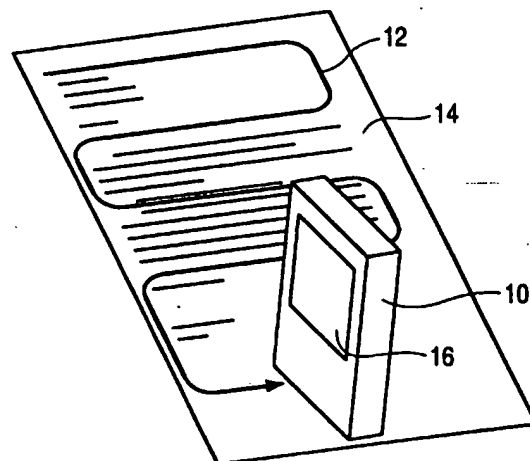
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ナビゲーション位置取得方法

(57) 【要約】

【課題】 スキャナ、特にハンド・スキャナのナビゲーション情報を効率的に取得する。

【解決手段】 センサ・アレイによって連続的時間間隔で捕捉されるイメージの間の相関関係に基づいてナビゲーションのための位置情報を決定する。そのため、センサ・アレイを介して先ず基準フレームを、次にサンプル・フレームを取得して、サンプル・フレーム、基準フレーム両方の基準特徴の間の関係を表す相関データを生成する。次に、相関データに基づいて基準フレームに対するサンプル・フレームの間の基準特徴の相対的変位を決定する。相対的変位を決定するため、一般的2次元テラ一級数展開式としてモデル化される相関データの相関表面の大域極値が使用される。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 センサ・アレイのナビゲーション位置を取得する方法であって、

上記センサ・アレイを介して基準フレームを取得するステップと、

上記センサ・アレイを介してサンプル・フレームを取得するステップと、

上記サンプル・フレームおよび上記基準フレーム両方の基準特徴の間の関係を表す相関データを生成するステップと、

上記相関データに基づいて上記基準フレームに対する上記サンプル・フレームの基準特徴の相対的変位を決定するステップと、

を含み、

上記相対的変位を決定するため、一般的2次元テラレー級数展開式としてモデル化される相関データの相関表面の全域極値が使用される、

ナビゲーション位置取得方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、一般的には、センサ・アレイに基づくナビゲーション手法に関するもので、特に、走査装置において使用されるナビゲーション技法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 センサ・アレイの位置を決定するナビゲーション方式は種々のアプリケーションにおいて使用されている。例えば、走査装置によって捕捉されるイメージを相関させるため、あるいは、マウスのようなカーソル制御デバイスの位置を決定するため、ナビゲーション方式が利用される。

【0003】 オリジナルのイメージを電子的に形成するスキャナはよく知られている。典型的に、スキャナによって提供される捕捉イメージは、メモリにデジタル形式で記憶されるピクセル・データのアレイである。ひずみのないイメージは、ピクセル・データのアレイへのオリジナルのイメージの忠実なマッピングを必要とする。スキャナは、典型的には、イメージ捕捉プロセスの間、忠実なマッピングの可能性を最大にするため、機械的制約を課す少なくとも1つの手段を含む。

【0004】 ドラム・スキャナ、フラットベッド・スキャナ、2次元アレイ・スキャナおよびハンド・スキャナは当業界において知られているスキャナの4つのタイプである。ドラム・スキャナは、固定速度で回転する円筒ドラムの表面にオリジナルを付着させる。ドラムの回転の間、ドラムの回転軸と平行する方向にイメージ・センサが動かされる。イメージ・センサの線形変位とドラム上のオリジナルの回転の組み合わせが、オリジナル全体の走査を可能にする。イメージ処理の間のいかなる瞬間においても、オリジナルに対するピクセル・データ・ア

レイの範囲内の現在位置は、ドラムの角度位置とセンサの並進位置を測定することによって、決定される。オリジナルが正しくドラムに付着される限り、そして、ドラム回転が正しく制御され、センサが線形パスに沿ったその変位において正しく制御される限り、オリジナルに対するピクセル・データ・アレイの位置は固定的である。

【0005】 フラットベッド・スキャナは、アレイの軸に対して垂直な軸に沿ってオリジナルに対して移動される線形アレイ・センサを含む。従って、1次元におけるセンサの位置は、センサの相対的移動を追跡することによって、把握することができる。垂直方向におけるセンサの位置は、輝度が測定されるべき特定アレイ・エレメントのアドレスを特定することによって暗黙的に決定される。フラットベッド・スキャナの1つの実施形態において、オリジナルが透明なプラテン上に置かれ、センサが、イメージ照射光源と共に、オリジナルに対して反対側のプラテン上に置かれる。オリジナルがプラテンに対して相対的に動かされない限り、ピクセル・データ・アレイは、捕捉されるべきイメージに対して固定される。

別の1つの実施形態においては、センサではなくオリジナルが動かされる。この第2の形態の典型はファクシミリ機である。高精度の用紙送りがイメージ捕捉プロセスの間の高度な位置の正確性を提供する。

【0006】 ドラムおよびフラットベッド・スキャナの利点には、少なくともA4の大きさのドキュメントに適応する能力が含まれる。更に、このようなスキャナの中には1回の設定でA1用紙を取り扱うことができるものもある。しかしながら、このようなスキャナは、制御、データ記憶およびイメージ操作のためホスト・コンピュータを必要とするので、一般に可搬性はない。

【0007】 2次元アレイ・スキャナは、機械的符号化制約なしに使用することが可能で、アレイとオリジナルが照射の間静止した状態に保たれることだけを必要とする。感光性エレメントの2次元アレイが、ピクセル・データ・アレイへのオリジナル・イメージのマッピングを直接実行する。しかし、8.5"×11"オリジナルの300 dpiへの1回でのマッピングは、2500×3300エレメントすなわち8,250,000ピクセルのアレイを持つイメージ・サンサを必要とするので、このようなスキャナはほとんどのアプリケーションにおいてコスト高である。

【0008】 従来型のハンド・スキャナは、オリジナル上に電子光学センサ・エレメントの線形アレイを移動させることをユーザに求める。移動は手操作による。コンピュータ"マウス"の操作において利用されるようなナビゲーション方法を使用して、アレイ位置情報が決定される。線形センサ・アレイが移動されるにつれて、オリジナルと接触している車輪、ボールおよびローラの回転が検知され、回転の機械的細部に基づいて位置情報が決定される。一般的には、オリジナルと接触する機械的エレメントの表面は、滑らないように、(例えばゴムのような

な)高い摩擦係数を持つ。走査プロセスの間単一の並進運動自由度を補強するため、堅固な軸によって接続された円筒ローラまたは2つの車輪が使用される場合もある。オリジナルに対する走査方向を固定するため、また、2つの車輪またはローラによって提供される並進運動制約を更に補強するため、直線エッジまたはその他の固定治具がたびたび使用される。それにもかかわらず、位置符号化という技法がスリップおよびスキップの影響を受けやすいものであるため、ピクセル・データ・アレ

イがオリジナル上のイメージに対応する情報を含まないことが多い。

【0009】ハンド・スキャナは、イメージ・データの記憶、処理ならびに使用のため、典型的には、パーソナル・コンピュータに直接接続される。イメージ・センサからのデータ率が走査速度を制限する傾向がある。スキャナは、所望の解像度に対する適切な速度を維持するため、緑または赤の発光ダイオードという手段によって、ユーザにフィードバックを提供する。一部のハンド・スキャナは、ユーザがスキャナをイメージ上であまりに速く移動することを防止するため、速度の上昇と共に機械的抵抗を増加させる電磁ブレーキを使用する。

【0010】ハンド・スキャナは、比較的小さいイメージ形成アレイを利用するので、1回の走査でA6より大きいドキュメントを扱うことは一般にできない。これは、比較的大きいドキュメントについて複数の走査帯を結合させる縫合アルゴリズムを必要とする。帯縫合はパーソナル・コンピュータによる独立した動作で行われる。ハンド・スキャナを用いて複数ページのビジネス・ドキュメントまたはレポートを走査することは、退屈なプロセスであり、しばしば低品質を生成する。

【0011】前述のように、ハンド・スキャナには典型的に何らかのタイプの固定治具が使用される。そのような固定治具がない場合、ハンド・スキャナがオリジナル上を移動するにつれ、多少の回転を伴う傾向がある。スキャナの移動の間ユーザの肘が平らな表面にとどまっていると、回転は、スキャナとユーザの肘の間の距離によって定まる半径を持つ可能性がある。結果として、走査された電子的イメージはゆがめられる。スキャナの走査帯の間のその他の曲線の運動もまたひずみを生成する原因となる。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】このように、走査プロセスの間にたとえ曲線運動があっても、ハンド・スキャナがオリジナル・イメージと走査結果の間に高度な対応性を持つことを可能にするナビゲーション方式が必要とされている。

【0013】

【課題を解決するための手段】発明の課題を解決するため、連続的時間間隔でセンサ・アレイによって捕捉される複数のイメージの間の相関に基づいて、センサ・アレ

イのナビゲーション位置を効率的に取得する方法および装置が提供される。

【0014】これは、上記センサ・アレイを介して基準フレームを先ず取得し、上記センサ・アレイを介してサンプル・フレームを連続的に取得することによって達成される。次に、サンプル・フレームと基準フレームの間の関係を表わす相関データが生成され、その相関データに基づいて、基準フレームおよびサンプル・フレームに含まれる基準特徴の変位が決定される。相関データの相関表面は、一般的2次元テラレー級数展開式としてモデル化される。

【0015】本発明の方法および装置を走査装置において使用することによって、連続的時間間隔において走査装置のセンサ・アレイによって捕捉されるイメージ・フレーム間の比較に基づいたナビゲーション情報を取得する効率的な方式が提供される。

【0016】

【発明の実施の形態】走査装置に関するナビゲーション方法が提供される。該ナビゲーション方法は、走査されているオリジナルの固有の構造関連特性を検出する少なくとも1つのナビゲーション・センサという手段によって基準フレームおよびサンプル・フレームを取得することを必要とする。イメージ・センサがオリジナルに対して相対的に移動する際の固有の構造関連特性の変化を監視することによって、オリジナルに沿ったイメージ・センサの運動を追跡することができる。好ましくは、監視される固有の構造関連特性は、オリジナルの用紙繊維またはその他の構成要素のような固有の構造的特徴である。ナビゲーションは、また、スペckル(すなわち、細かい斑点状の干渉模様)に基づいて実施することもできる。この場合、オリジナルに沿ったイメージ・センサの運動は、ナビゲーション情報を得るためコヒーレント照明を使用して生成されるスペckル・パターンの変化を監視することによって、追跡される。

【0017】本明細書において、“固有の構造関連特性”は、オリジナル上のイメージ・データならびに体系的な位置決めデータを形成することからは独立している因子に帰属するオリジナルの特性として定義される。ナビゲーション情報は、スペckル情報の位置信号または個々の固有の構造的特徴の追跡を可能にする位置信号のような、固有の構造関連特性の検出に応答する位置信号を生成することによって形成される。本明細書において、“固有の構造的特徴”とは、オリジナルを形成するプロセスから派生する特徴であるが、オリジナル上のイメージ・データならびに体系的な位置決めデータを形成することからは独立しているオリジナルの特徴として定義される。例えばオリジナルが記録される媒体が紙製品であれば、対象とされる固有の構造的特徴を紙の繊維とすることができる。別の例をあげれば、光沢のあるオリジナルまたはオーバーヘッド透過フィルムを走査するイメージ

【0022】ナビゲーション・センサは、イメージ・セ

【0024】図1には、オリジナル14に沿って曲がりくねった経路12をたどる手持ち式走査装置10が示されている。好ましい実施形態において、オリジナルは、紙、オーバーヘッド透明フィルムまたはイメージを保持する表面を持つその他のいかなる媒体でもあり得る。ナビゲーションの間、曲がりくねった経路に沿った位置情報を提供するため必要とされるコントラストをオリジナルの固有構造関連特性がそれらオリジナルの表面上に生成する。典型的には、イメージ・データの調整のため、固有構造特徴の位置が追跡され、その位置情報が使用されるが、その他の形態を使用することもできる。走査装置は、自己完結型であり、電源はバッテリーであることが

置は、自己完結型であり、電源はバッテリーであることが

望ましいが、外部電源またはコンピュータあるいはネットワークのデータ・ポートへの接続端子を含むこともできる。図1の走査装置10は画像表示機構16を含む。表示機構は、捕捉したイメージをほとんど即時に表示することができる。しかし、表示機構は走査装置の使用にとって必須ではない。

【0025】走査装置10は3つの自由度を許容する。2つの自由度は並進運動であり、1つは回転である。第1の自由度は、オリジナル14に沿った側面から側面への運動(すなわちx軸運動)である。第2の自由度は、オリジナル14に沿った上方および下方への運動(すなわちy軸運動)である。第3の自由度は、装置の操作の結果イメージ・センサ・エレメントの線形アレイの位置がオリジナル14のエッジに対して不適切に回転(θ軸運動)することである。すなわち、イメージ形成エレメントの線形アレイは、装置並進運動の方向に直角でない接合角度を持つ。

【0026】図1乃至図3を参照すれば、走査装置10の前側18は、オリジナル14とイメージ形成センサ22の間の適切な接触の維持に役立つ軸回転部材20を含む。ナビゲーション・センサ24および26は、イメージ形成センサ22の両端に位置する。ナビゲーション・センサは、軸回転部材上に装着されるので、イメージ形成センサに対して固定的位置にある。

【0027】物理的にコンパクトであるようにするため、イメージ形成センサ・アレイ22は、好ましくは、接触イメージ装置であるが、コンパクトさが重要でないアプリケーションまたは比較的小さいイメージが要求されるアプリケーションにおいては、倍率が1単位より小さい投影光学機構を利用するセンサを使用することもできる。そのようなアプリケーションでは、イメージ形成センサ22のエレメントは比較的小さくなくならず、また、すべてコンパクトに実装されなければならない。接触イメージ形成装置は、典型的には、Nippon Sheet Glass Company Limitedの米国における登録商標であるSELFOCという商標の下で販売されているレンズを使用する。さほど一般的ではないが、レンズを使用せず、光源のアレイ・エレメントと隣接センサの交互配置を使用して接触イメージ形成を実施することもできる。走査アプリケーションに関する従来型のイメージ形成センサを使用することもできる。また、イメージ形成センサを、照光光源、照光光学部品およびイメージ伝達光学部品を含む装置の一部とすることもできる。

【0028】イメージ形成センサは、離散的な光学反応エレメントの線形アレイとして示されている。エレメントの間隔は、スキャナ10の空間的解像度を決定する役割を果たす。例えば、101.6mmの長さを持つ線形アレイは、300dpiの解像度を達成するには1200のセンサ・エレメントを必要とする。センサは、CCD、アモーフアスSiホトダイオード・アレイ、あるいは、当

界において既知のいかなるタイプの線形アレイ・センサでもよい。

【0029】イメージ形成センサ装置の設計における重要因子は速度である。イメージ形成センサ22は、好ましくは、秒あたり約10Kというサンプル率で各ピクセルのイメージを形成することができる。線形イメージ形成アレイは、一般に、直列データストリームを生成する。直列データストリームにおいては、ピクセル値すなわち電荷がシフト・レジスタに置かれ、次にシフト送りされる。所望の速度の達成は、ピクセル値が比較的少ないセルを通してシフト送りされるように、全体のイメージ・アレイからの非常に高速な直列伝達速度または論理タップのいずれかを必要とする。これが、デジタル処理の利点である並列性につながる。

【0030】速度要件の別の帰結は、オリジナルの表面におけるピクセル領域の生成および各アレイ・エレメントに収集ならびに搬送される放射光線の立体角度が、100マイクロ秒というオーダーの集積時間において検出可能な信号を生成することができる十分な大きさでなければならないという点である。補強オプションとして、各検出エレメントが反応するセンサ・ピッチの有効小数部を増加させるため、光学エレメントをセンサに追加することができる。典型的にはアレイ・マトリックスに未使用領域が存在するので、そのような光収集光学部品は感度を増加させる。

【0031】イメージ形成センサ22の単純な修正によってカラー・イメージの検出を可能にすることができる。カラー・イメージ形成のため、相互に平行な3つの線形アレイを配置し、それらアレイの各々は、入射光の赤、緑および青成分をそれぞれ選択的に通過させる少なくとも1つの組み込みフィルタを備え持つ。代替的には、広帯域の感度を持つ単一アレイが赤、緑および青の光源によって順次照光される配置も可能である。

【0032】イメージ形成センサ22の動作を改良する照明に関する限り、琥珀色波長の高強度発光ダイオードの直線アレイを使用することができる。しかしながら、好ましい照光光源およびどのような光学エレメントの選択も、オリジナルの媒体に依存する。不必要な信号を無視しながら、オリジナル14の所与の領域の走査の間に取得されるコントラスト・イメージ・データを最大にするように光の波長が選択される。照光光学部品は、LEDドーム・レンズから構成されるか、あるいは、高精度に成形された光学エレメントから成る光パイプを含む。後者は、最小限度の光量損失で照射光をオリジナル上へ通過させる。そのような設計は、広範囲にわたる角度でオリジナルの目標領域の相対的に均一な照光を可能にするが、鏡面反射を避けるため法線入射光線をブロックする。

【0033】図1において、曲がりくねった経路12は4回と端数の走査帯(すなわちオリジナル14に対する

端から端への走査)を持つものとして示されている。最も一般的アプリケーションに役立つイメージ形成センサ22は、25.4mmと101.6mmの範囲内の長さを持つ。センサ22が63.5mmの長さを持つとすれば、A4用紙は4回または5回の走査帯で走査される。帯は、縫合プロセスを使用してオリジナル・イメージの忠実な複製を生成することができるように、オーバーラップの領域を含まなければならない。

【0034】走査装置10は、典型的には、少なくとも1つのナビゲーション・センサ24または26を含む。好ましい実施形態においては、走査装置は、イメージ形成センサ22の両端に配置されるペアのナビゲーション・センサを含む。1次元アレイの光電子工学エレメントを使用することも可能ではあるが、好ましい実施形態においては、各ナビゲーション・センサは、2次元アレイ・エレメントである。オリジナル14に対する走査装置10の動きを追跡するためナビゲーション・センサ24ならびに26が使用される。

【0035】好ましい実施形態において、各ナビゲーション・センサ24ならびに26は、走査装置10の位置に関連する情報を生成するため、オリジナルの固有の構造関連特性に関連したイメージを捕捉する。大部分の従来技術の走査装置に関する限り、固有の構造的特徴はノイズとみなされる。図1乃至図3の走査装置10に関して、そのような特徴は、イメージ形成センサ22にとってノイズであるが、ナビゲーション・センサ24ならびに26が位置情報を生成する基礎を提供するため使用されることができる。媒体に固有であるか媒体上に形成される構造的変化を検出することによって表面模様役立つ高コントラスト・イメージを生成することができる。例えば、イメージは、固有の構造的特徴の谷の陰影と頂上の輝点の間のコントラストに基づいて形成される。そのような特徴は、典型的には、顕微鏡で見ることができるほどの大きさで、一般的印刷媒体では10乃至40 μ mの範囲の大きさである。代替的には、コヒーレントビームの正反射が明ならびに暗の領域のコントラスト・パターンを生成するので、スペックルを使用することもできる。コントラスト情報の第3のソースはカラーである。カラー・コントラストは表面模様と無関係である。可視域の光で模様と無関係な表面を光で照光する時さえ、異なるカラー(例えば異なる濃淡レベル)の領域の間にカラー・コントラストが存在する。

【0036】しかしながら、ナビゲーション情報がオリジナルの固有構造関連特性と無関係であるようなアプリケーションに本発明を使用することは意図されている。例えば、図2のナビゲーション・センサ24ならびに26の一方または両方を使用して、連続的イメージを開発してオリジナル14に沿ったイメージ・センサ22の位置および方向を決定することができる。この実施形態において、3つのセンサ22、24および26のすべてがオ

リジナル上のテキストのイメージを形成するが、センサ22からの信号だけがイメージ・データを取得するため使用される。ナビゲーション・センサ24ならびに26からの信号は、イメージに基づくナビゲーション情報を取得するため使用される。

【0037】X、Yおよび θ 位置情報を取得および処理するため非イメージ形成技法を使用することもできる。あいにく、代替手段の多くは、コンパクトさ、使用上の便宜性、速度、運動の自由度、電力消費、正確性、精度ならびにコストに関する制約を持つ。位置情報を取得するため利用できる代替的非イメージ形成技法の1つは、ナビゲーション・センサの代わりに1つまたは複数の符号化車輪を利用する。符号化車輪は走査される表面上をスリップせずに転がり、走査装置が直線または曲線の軌跡に沿って移動することを可能にする。符号化車輪が共通の軸の上にあることは重要ではない。車輪はスイベル(すなわち回り継手)に装着することができる。回転を監視するため接続される符号器が、開始位置ならび方向に対するイメージ形成センサの位置ならびに方向を計算するための入力データを作成する。

【0038】ナビゲーション情報を取得するため利用できる代替的非イメージ形成技法の別の1つは、コンピュータ・マウスに対する場合と同様なトラックボールを使用するものである。上述された各符号車輪の代わりにトラックボールが使用される。各トラックボールから2次元の変位情報を取得するため符号器が使用される。別の手法において、タブレットに構築される協調的(能動的あるいは受動的)グリッドまたはその他の基準に対する位置および方向を検出するため、図2のナビゲーション・センサの代わりに光学的あるいは電子的(容量性、抵抗性あるいは誘導性)センサが使用される。このタブレットは走査されるオリジナルに対する支持役をする。

【0039】位置ならびに方向情報を取得する非イメージ形成技法の更に別の1つは、加速度計を利用するものである。ボード搭載慣性航法プラットフォームが使用され、加速度が検出され、速度を取得するため1度、位置を取得するため2度積分される。または、ばね吊り質量の速度が検出され、位置を取得するため1度積分される。方向を直接検出するためジャイロスコープを使用することもできる。

【0040】更に別の技法は、種々の機械的リンク機構のいずれかを使用するもので、それらを用いて、走査されている媒体に対して固定的な基準座標に対する位置ならびに方向が追跡される。機械的部材の相対的運動を測定するため接続されるセンサ手段によって位置ならびに方向情報が取得される。これらのセンサは、相対的あるいは絶対的タイプのいずれかであり、検出する直接的な位置ならび方向に基づくか、あるいは、加速度または速度を検出してそれを1度または2度積分して位置情報を取得する。

【0041】更に、非接触遠隔検出を使用して、走査されているオリジナルに対して固定的な基準座標に対する走査装置の位置ならびに方向を測定することができる。そのような非接触検出の例には、(例えば光学的またはラジオ周波数での)電磁場波またはビーム、電気的効果(例えば容量性効果)および磁性効果(例えば誘導性効果)の使用が含まれる。これらの技法は、標準的または微分大域位置づけ技術を利用し、潜在的には衛星を使用することができる。これらの技法は、また、伝統的なナビゲーション/測量方法(例えば三角測量方式)を含むことも

10 できる。これらは、また、形状光線を使用してこれらのビームが移動オブジェクトを妨げる場所のイメージに基づいて位置を推定するような、ロボット工学技術で使われる手法を含めることもできる。

【0042】図2のナビゲーション・センサ24ならびに26は、オリジナル14の移動イメージを効果的に観測して、連続的観測の間の2次元変位を標示する情報を生成する。詳細は後述されるが、イメージ形成センサ22からのイメージ・データの適切なマッピング(対応付け)を決定するように諸エレメントを処理することによ

20 ってナビゲーション・センサからのピクセル値が取り扱われる。処理エレメントが特定ピクセルおよびその最隣接ピクセルにはたらきかけて、各ピクセル位置における相関値アレイを生成する。相関値は、表面構造の現在時イメージと固有の構造上の特徴の既知の位置を表す記憶されたイメージの間の比較に基づく。この場合、記憶されたイメージは位置基準の役目を果たす。しかしながら、出力イメージを形成するため入力イメージ・データを処理する際に相関プロセス以外の操作を利用することもできる。

【0043】図4および図5には、照光光学部品と運動するナビゲーション・センサ24が示されている。オリジナル14が、ナビゲーション・センサ24によって紙繊維が検出されることができるとい

源28の出力は調整を必要とする場合がある。

【0044】図4において、光源25からの光は、照光光学部品36において視準され、振幅分割ビーム分波器37によって方向を向け直される。ビーム分波器を直接通過するLEDからの光エネルギー部分は図4に示されていない。ビーム分波器からの光エネルギーは表面に対する法線に沿ってオリジナル14を照光する。

【0045】図4に示されている光エネルギーは、オリジナル14から反射または拡散され、エレメント38におけるフィルタリングおよびエレメント39におけるイメージへの集束のためビーム分波器37を通過する光エネルギー部分である。オリジナルからビーム分波器へ通過しビーム分波器から反射する光エネルギーの部分は示されていない。ナビゲーション・イメージ形成光学部品の拡大倍率は、集束される光を検出する2次元センサ・アレイ24の視界フィールドにわたって一定でなければならない。

【0046】多くのアプリケーションにおいて、ナビゲーション光学部品の変調伝達機能すなわち光学的周波数反応の振幅測定は、ナビゲーション・センサのセンサ・エレメントのピッチおよび光学エレメントの拡大倍率によって決定されるナイキスト周波数の前に減衰を提供するようなものでなければならない。光学的エレメントは、また、背景照光がノイズを発生しないように設計されなければならない(注：波面分割ビーム分波器を使用することもできる)。

【0047】入射角の選択はオリジナルの材料特性に依存する。オリジナルの表面が光沢のあるものでなければ、照光のかすめ角度は、比較的長い陰影と比較的明確なコントラストまたはAC信号を生成する。しかしながら、照明角度がオリジナルに対する法線に接近するにつれて、DC信号レベルは増加する。

30 【0048】オリジナルの表面が顕微鏡視覚レベルで高度な不均等を持つようなアプリケーションの場合、かすめ角度30°でのオリジナル14の目標領域の照光はうまくはたらく。例えば、オリジナルが印字用紙、ボール紙、繊維または人間の皮膚である場合、かすめ角度での光源28からの光の導入は固有の構造的特徴に関連した高いSN比のデータを提供する。一方、写真、光沢のある雑誌ページまたはオーバーヘッド透明フィルムのようなオリジナルに沿って走査装置の運動を追跡するため位置情報が必要とされるアプリケーションにおいては、直角の入射角でのインコヒーレント光の使用がむしろ好ましい。インコヒーレント光を使用する直角照明によって鏡面反射されたフィールドでオリジナルを見ることによって、イメージならびに相関に基づくナビゲーションを可能にする上でテクスチャ・コンテンツの点で十分豊富なイメージが提供される。オリジナルの表面は顕微鏡可視的起伏を持つので、表面があたかもタイルまたはファセットのモザイクであるかのように表面は光を反射す

る。オリジナルの“タイル”の多数は、法線からわずかに拡散する方向に光を反射する。散乱光を含む視界および鏡面反射された光は、あたかも表面が多くのそのようなタイルから構成され、タイルの各々が法線から若干ずれているように組み立てられているかのようにモデル化される。このモデル化は、W.W. Barkas著“Light Scattered from a Surface of Low Gloss Into Its Specular and Diffuse Components”(Proc Ph s. Soc., Vol. 51, pages 274-292 (1939))に記載されているものと同様のものである。

【0049】図4は、オリジナル14の表面の法線に沿って方向付けられる、インコヒーレント光源35による照光を示す。図5は、かすめ角度30°での照光を示している。第3の実施形態においては、照光は提供されない。その代わりに、背景光すなわち周囲環境からの光を使用してナビゲーション情報が蓄積される。

【0050】第4の実施形態においては、コヒーレント照明が直角入射で導入され、スペックルに基づくナビゲーションを可能にする。ナビゲーション・センサに対するスペックルの運動を監視することによって、走査装置とオリジナルの間の相対運動が追跡される。イメージ形成光学部品を使用することなくコヒーレント照明が使用されるならば、照明の小さい領域を選択して、オリジナルの表面とナビゲーション・センサ24の光検出器アレイの間に比較的大きい間隔を持つことによって、コヒーレント照明による良好なスペックル・セル・サイズがナイキスト・サンプリング基準を満たすことのできる大きさとなる。ビーム分波器の使用によって、入射照光および検出される拡散光の両者の方向が、図4の場合に達成されたように、オリジナル表面の法線に近接させることが可能となる。

【0051】図6には、オリジナルの表面上に印刷されているブロック46を有するオリジナル44を横切って動かされるスキャナ10が示されている。スキャナ10はオリジナルの平面におけるいかなる運動上の制約も受けないので、ユーザがスキャナを操作する際ユーザの前腕が肘を支点に回転するのでスキャナがオリジナル上で曲線の経路をたどる傾向がある。図6において、走査装置がブロック46を横切って曲がった経路48をたどるように示されている。走査装置の下側のエッジが、回転軸を画定する肘に近い側のエッジであるとすれば、この下側エッジは上方に比較して短い半径を持つ。従って、イメージ形成センサのイメージ形成エレメントはブロック46を通過するために必要な時間ならびに距離の点で変動する。走査装置が点線で示されている第2の位置52に動かされると、ゆがめられたブロック・イメージ50が捕捉される。

【0052】捕捉されたイメージ50は、以下に記述される処理が行われずに記憶されるイメージである。しかし、イメージ形成センサがブロック46に関連したデー

タを捕捉する時、ナビゲーション情報が取得される。好ましい実施形態において、1つまたは複数のナビゲーション・センサが、オリジナル44の固有の構造的特徴に関連したデータを捕捉する。ブロック46に対するイメージ形成センサの変位を決定するため、走査装置10に対する固有の構造的特徴の運動が追跡される。その後、忠実な捕捉イメージ54が形成される。イメージ54は“調整された”イメージと定義される。

【0053】図7には、ナビゲーション処理の1つの実施形態が示されている。固有の構造的特徴に関連したデータのような、ナビゲーション情報の連続したフレームを相関させることによってナビゲーション処理が実行される。特定の時間におけるナビゲーション・センサの位置に関連する情報を提供するため、相関関係は連続したフレームにおける固有の構造的特徴の位置を比較する。次に、ナビゲーション情報を使用して、イメージ・データが修正される。図7の処理は、典型的には、ナビゲーション・センサの各々毎に実行される。

【0054】第1のステップ56において、基準フレームが取得される。基準フレームは、実際には、開始位置である。その後、ナビゲーション・センサから位置データのサンプル・フレームを取得して、基準フレームと取得したサンプル・フレームの間の相関を計算することによって、ナビゲーション・センサの位置が決定される。

【0055】初期基準フレーム56の取得は、イメージ形成プロセスの開始時に実行される。例えば、走査装置のオリジナルへの単なる接触によってそれは起動される。または、走査装置がイメージ・プロセスならびナビゲーション・プロセスを始動させる起動ボタンを含むこともできる。また、各ナビゲーション機構の照光系の定期的パルスによってプロセスを始動させることもできる。事前指定された反射しきい値を超える反射信号、または、運動を示す相関信号があれば、基準フレームが取得される。

【0056】ナビゲーション処理はコンピュータで実行されるが、この実施形態の概念が図7および図8を参照して記述される。基準フレーム62はT形の固有の構造的特徴64のイメージを持つものとして示されている。基準フレームのサイズは、走査装置の最大走査速度、構造的特徴のイメージ形成における支配的空間周波数およびセンサの解像度のような因子に依存する。32ピクセル(N)×64ピクセル(M)のナビゲーション・センサに関する基準フレームの実際のサイズは24×56ピクセルである。

【0057】その後の時間(dt)にナビゲーション・センサはサンプル・フレーム66を取得する。サンプル・フレーム66は、基準フレーム62に対して相対的に変位されるが、実質的に同じ固有の構造的特徴を示す。T形特徴64の相対的変位が走査装置の並進運動の速度においてナビゲーション・センサの1ピクセル未満であるよ

うに、時間間隔 dt がセットされる。許容可能な時間間隔は、600dpiにおいて速度0.45メートル/秒に対して50 μ sである。この相対的変位を本明細書においては"マイクロステップ"と呼ぶ。

【0058】走査装置が基準フレーム62を取得するステップ56とサンプル・フレーム66を取得するステップ58の間の時間間隔の間に移動したとすれば、T形特徴の第1および第2のイメージは特徴がシフトしたイメージである。好ましい実施形態においては dt は1ピクセルの運動を可能にする時間より小さいが、図8の表現は、特徴64が上方および右方へ1ピクセルだけシフトすることが許容されているものである。完全な1ピクセルのシフトは表現を単純化するためにのみ仮定されている。

【0059】図8におけるエレメント70は、フレーム68のピクセル値の8つの最近傍ピクセルへの順次シフトを表している。すなわち、例えば、ステップ"0"はシフトを含まず、ステップ"1"は左斜め上へのシフトであり、ステップ"2"は上方シフトである。このようにして、ピクセル単位シフトされたフレームがサンプル・フレーム66と組み合わせられ、位置フレーム・アレイ72を生成する。"位置0"に指定された位置フレームはシフトを含まず、その結果はフレーム66と68の単なる結合である。"位置3"は、影をつけられたピクセルの数が最小であり、最も高い相関を持つフレームである。相関結果に基づいて、サンプル・フレーム66におけるT形特徴64の位置が以前に取得された基準フレーム62における同じ特徴の位置に対して斜め右上へシフトしていると決定される。これは、走査装置が時間 dt の間に左下方向へ移動したことを意味する。

【0060】その他の相関手法を利用することはできるが、許容可能な手法は、"差の平方和"相関である。図8の実施形態の場合、9つの相関係数($C_k = C_0, C_1, \dots, C_8$)がある。)これらはエレメント70における9つのオフセットから作成され、相関係数は次の式(数1)によって定義される。

【0061】

【数1】

$$C_k = \sum_i \sum_j (S_{ij} - R_{(ij) \cdot k})^2$$

但し、 S_{ij} はサンプル・フレーム66の位置 ij においてナビゲーション・センサが測定した値を示し、 R_{ij} は、エレメント70において k 方向にシフトしたフレーム68におけるナビゲーション・センサが測定した値を示す(k はエレメント70におけるシフトの識別子である)。図8において、 $k=3$ が相関係数に最も低い値を与える。

【0062】フレームからフレームへの特徴の変位を決定するため連続したフレームにおける全く同じ特徴の位置を見つけるため相関が使用される。このような変位の総和および関連光学部品の設計を通して導入されるスケ

ール・ファクタの補正が走査処理の進行に伴うイメージ形成センサの変位を決定する。

【0063】前述のように、変位が1ピクセルの次元を超えないことを保証するようにフレーム率が十分高く選択されるので、フレーム対フレーム相関は"マイクロステップ"と呼ばれる。サンプリング過剰はサブピクセル変位精度を提供する。図7を参照すれば、相関の各計算64の後にマイクロステップを進めるか否かが判断される(ステップ74)。マイクロステップが必要であれば、基準フレームがシフトされる(ステップ76)。このステップにおいて、図8のサンプル・フレーム66が基準フレームとなり、新しいサンプル・フレームが取得される。次に相関計算が繰り返される。

【0064】このプロセスは高い度合いの相関一致を提供するが、基準フレームに対して発生する誤差が、サンプル・フレーム66の各連続したシフト(ステップ76)毎に累算される。"ランダムな運動"の誤差の増加率に対して制限を設けるため、サンプル・フレームは独立したバッファ・メモリに保存される。この別に保存されたサンプル・フレームは、相関計算の後続のシリーズに関して新しい基準フレームになる。後者の相関は"マクロステップ"と呼ばれる。

【0065】マクロステップを使用することによって、 m 個のイメージ・フレーム変位すなわち m 回のマイクロステップの距離にわたるスキャナ変位が一層正確に決定される。1つのマクロステップにおける誤差は単一の相関計算の結果であるが、 m 回のマイクロステップの同等の誤差は単一マクロステップの誤差の $m^{1/2}$ 倍に相当する。 m マイクロステップにおける誤差の平均は m が増加するほどゼロに近づくが、誤差の平均における標準偏差は $m^{1/2}$ として成長する。このように、マクロステップを定義する2つのフレームが大きな共通イメージ領域を持たない程度に相互に間隔をあけていない限り、実際的な大きさ m を持つマクロステップを使用することによって累積誤差の標準偏差を減少させることには利益がある。

【0066】サンプリング間隔 dt は定数である必要はない。サンプリング間隔は先行した測定値の関数として決定することもできる。可変 dt を使用する1つの方法は、連続基準フレームの間の相対的変位を一定の限度内に保つことによって変位計算の正確度を向上させるためのものである。例えば、上限は1ピクセル変位であり、一方、下限は、ナビゲーション・データを処理する際の数字の丸めによって決定される。

【0067】図9を参照すれば、イメージ形成センサ22において生成されたイメージ信号は、次に、ナビゲーション・データに基づいて"位置タグ"を付けられる。1つの実施形態において、2つのナビゲーション・センサ24ならびに26からのピクセル値は、図7および図8の動作を実行するためナビゲーション・プロセッサ80によって受け取られる。計算された相関に基づいて、第

1のナビゲーション・センサ24の現在位置に関する座標 (X_1, Y_1) および第2のナビゲーション・センサ26の現在位置に関する座標 (X_2, Y_2) が決定される。ナビゲーション・プロセッサ80は、また、ピクセル増幅器82およびA/D変換器84を経由してイメージ形成センサ22のピクセル値を受け取る。図9の変換器84がイメージ・センサ22およびそれ自身からの単一タップだけを持つ単一の変換器として示されているが、各々がそれぞれのタップを持つ複数変換器を使用することもできる。

【0068】ナビゲーション・センサの現在位置座標にはイメージ形成センサの範囲内のピクセルの数に対応するデータ線の最後にタグが付けられる。従って、ナビゲーション・プロセッサ80の出力86は位置タグ付きデータストリームである。図10において、Nピクセル・セルの両端に位置座標セル90、92、94および96を持つようにデータストリームの増分88が示されている。この場合セルの順序は必須ではない。

【0069】用紙繊維位置トランスデューサに関して完全に解析的ナビゲーション・アルゴリズムを使用することによって並進運動のxおよびyコンポーネントが計算される。このアルゴリズムは、一般的2次2次元テラ一級数展開式

$$f(x, y) = a_{00} + a_{01}x + a_{02}y + a_{11}xy + a_{20}y^2$$

として任意の相関表面をモデル化する。 $\{x, y\}$ 平面における(回転、せん断および反射の任意の合成のような)一般のアフィン変換およびそれに続く3次元空間に埋め込まれた楕円放物面への3次元変換の適用を調べることにによってこの選択は動機付けされる。3×3相関グリッドに記憶されたデータを2次6パラメータ・モデルを使用して計算される期待値と比較することによって、一般的線形最小2乗問題が公式化される。これら6つのパラメータの最適値の計算は、2乗誤差の対応する総和を分析的に最小化し、相関データ値の単純な線形結合から成る解のセットを取得することによって、行われる。このような最適モデル・パラメータの既知のセットを所与とすれば、 $\{x, y\}$ 平面における相関表面の2次元変換が計算される。このアルゴリズムは効率的であり、変位解に対

$$C_{i,j}^k = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |r_{m,n} - c_{m-i, n-j}|^k$$

但し、 $r_{m,n}$ ($C_{m,n}$)はピクセル $\{m, n\}$ における基準(比較)イメージのデジタル化された値であり、 $1, j \in \mathbb{Z}$ はピクセル単位で測定された、基準フレームに対する比較フレームのシフトを表す。原理的には $k \in \mathbb{R}, k > 1$ も可能であるが、典型的には $k \in \mathbb{N}$ である。

【0074】用紙繊維の同じ領域の相対的に変位されたイメージに上式(1)を適用することによって、図15に示されるような"ボウル形"の相関表面が生成される。いかなるナビゲーション方式も、まず、この相関表面の正

する妥当性検査は無視できるほどの計算コストで実行できる。現在時ナビゲーション機構非ゼロ平均差検出相関表面が重要な関心事ではあるけれども、このアルゴリズムは、並進運動ポイントにおいて大域極値を持ついかなる2次表面にも適用することができる。

【0070】原理的には、紙繊維イメージが捕捉され比較フレームへロードされた後このアルゴリズムは実行することができる。しかしながら、実際問題として2次元並進運動が大きい場合、相関表面の2次近似が失敗し、計算された変位が不正確となる可能性がある。新しい基準紙繊維イメージの各々の自動相関の直後に表面の形状を固定することによってナビゲーション誤差を線形にすることができる。このような誤差の大きさを減少させる3つの方法が記述される。それらは、立方体相関関数の使用、相関表面再形成および事後線形補正である。また、3×3相関グリッドの形態で記憶されたデータの4セルおよび6セル・サブセットだけを必要とする修正アルゴリズムの集合がピクセル・エッジならびにコーナの近傍で使用される。

【0071】基本的ナビゲーション・アルゴリズムの実行より前の正確な位置予測に対する必要性が、数値的に効果的な位置予測値のクラスを使用することを望ましくさせる。起点の中心におかれた1ピクセル四方のピクセル境界に実験的ドメインが制約されることを保証するため、この位置予測はナビゲーション・マイクロステップ・アルゴリズムによって使用される。"平滑化"アルゴリズムのクラスを適用して、記憶されたマクロステップ座標の統計的誤差を更に減らすことができる。

【0072】相関表面のモデルとしての楕円放物面

紙繊維イメージ相関
超小型軽量スキャナ・ナビゲーション・トランスデューサ(ナビゲーション機構)が、光センサ・アレイの下に照光された用紙繊維の(図14に示されているような)イメージを直接初期的に捕捉する。ナビゲーション機構は、引き続いて、次式(1)の非ゼロ平均差検出関数を使用して、リアルタイム相関処理を実行する。

【0073】

【数2】

(1)

確な数値モデルを構築しなければならない。モデルの複雑さはリアルタイム・ナビゲーション・システムの要件によって制約されなければならないが、モデル自身の範囲が、ナビゲーション機構がセンサの相対的位置を推定することができる最大の正確度を制限する。この点を考慮して、相関ボウルを楕円放物面で表示することが試みられる。そのような2次式モデルによって、ナビゲーション問題を強固な数理的基礎の上に置くことが可能となる。

【0075】図15の(A)および(B)は、式(1)によって定義される“平方差の総和”相関関数 $C_{0,0}^2$ を図14のマゼラン用紙繊維イメージ・データセットに適用することによって計算される相関表面を示す。

【0076】アフィン変換および楕円放物面

$z'=f'(x',y')$ によって記述される単純な楕円放物面を考慮することによってナビゲーション機構相関表面の初期的デジタル化3次元モデル表現として x および y の2次関数が選択される。但し、 $z'=f'(x',y')=q_{20}x'^2+q_{02}y'^2$ である。

【0077】 $q_{20}, q_{02} > 0$ であれば、表面は、 $(x',y')=(0,$

$$c = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}$$

【0080】 z' 軸の周囲を角度 ϕ 回転するケースでは C は次式(4)という形式を持つ。

$$c = R(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

【0082】しかしながら、式(3)は、また、後続の回転、せん断および反射の任意の合成と共に、せん断および反射のような2次元変換を表す点に注意する必要がある。

【0083】2次元アフィン変換の適用に続いて、ベクトル $\{x_0, y_0, z_0\}$ による3次元変換が実行される。このベクトルは座標 (x,y,z) によって指定される実験室基準フレームの範囲内に収まる。並進運動およびアフィン変換の両者を(順に)反転させることによって、ノイズのない相関表面のオリジナルの座標が次のように実験室座標で表現される。

$$f(x,y)=a_{00}+a_{10}x+a_{01}y+a_{20}x^2+a_{11}xy+a_{02}y^2 \quad (6)$$

$$a_{20}=q_{20}c^2_{11}+q_{02}c^2_{21} \quad (7a)$$

$$a_{02}=q_{20}c^2_{12}+q_{02}c^2_{22} \quad (7b)$$

$$a_{11}=2(q_{02}c_{11}c_{12}+q_{02}c_{21}c_{22}) \quad (7c)$$

$$a_{10}=-(a_{11}y_0+2a_{20}x_0) \quad (7d)$$

$$a_{01}=1(a_{11}x_0+2a_{02}y_0) \quad (7e)$$

$$a_{00}=z_0+a_{11}x_0y_0+a_{20}x_0^2+a_{02}y_0^2 \quad (7f)$$

注：実験室座標系における変換された表面は、 $a_{mn}x^m y^n$ という形式の6つの項を持つ(但し、 $\{m,n\} \in \{0,1,2\}$ および $0 \leq m+n \leq 2$)。更に、2つの係数 a_{10} および a_{01} は、変位 $\{x_0, y_0\}$ で表され、これによって、上式(7d)および(7e)を反転して次式が得られる：

$$x_0=(a_{01}a_{11}-2a_{10}a_{02})/(4a_{20}a_{02}-a^2_{11}) \quad (8a)$$

$$y_0=(a_{10}a_{11}-2a_{10}a_{02})/(4a_{20}a_{02}-a^2_{11}) \quad (8b)$$

【0085】言い換えると、5つの係数 a_{10} 、 a_{01} 、 a_{20} 、 a_{11} および $\{x_0, y_0\}$ が数値的に一旦決定されれば、逆変換行列 c の元素または2つの係数 $q_{2,0}$ ならびに $q_{0,2}$ のいずれかを明示的に見出すことなく、変換ベクトル $\{x_0, y_0\}$ のコンポーネントは計算することができる。

【0086】図17の(A)および(B)は、モデル関数

0)においてユニークな最小値 $z'=0$ を持つ。このケースにおいて、 $f'(x',y')$ の特定輪郭平面定数 $z'=z_0$ との交点によって形成される楕円の縦および横軸は、 $(z_0/q_{20})^{1/2}$ および $(z_0/q_{02})^{1/2}$ によってそれぞれ与えられる。

【0078】 $\{x,y\}$ 平面における一般的2次元アフィン変換を表面 $z'=f'(x',y')$ に適用することによって、変換の逆元が次の式(3)のマトリックスによってデカルト座標で表現される。

【0079】

10 【数3】

(3)

【0081】

【数4】

(4)

$$x'=c_{11}(x-x_0)+c_{12}(y-y_0) \quad (5a)$$

$$20 \quad y'=c_{21}(x-x_0)+c_{22}(y-y_0) \quad (5b)$$

$$z'=z-z_0 \quad (5c)$$

【0084】図16は、軸 z' の周囲の角度 ϕ の回転および引き続くベクトル (x_0, y_0) の並進運動という特別のケースにおいて式(5a)および式(5b)によって与えられる2次元アフィン変換の概要図である。実験室座標系 $\{x,y,z\}$ における変換されたモデル表面のための関数形式は、式(5a)ー式(5c)を式(1)に代入することによって得られる。すなわち $z=f(x,y)$ である。但し、

$$f(x,y)=a_{00}+a_{10}x+a_{01}y+a_{20}x^2+a_{11}xy+a_{02}y^2$$

を図15の(A)および(B)に示されたデータに適用することによって得られる最良の最小自乗法表面を表す。但し、 $a_{00}=132$ 、 $a_{10}=8$ 、 $a_{01}=12$ 、 $a_{20}=526$ 、 $a_{11}=24$ 、 $a_{02}=934$ である。

【0087】図18は、 3×3 ナビゲーション機構ピクセルシフト相関グリッドと式(6)によって定義された $f(x,y)$ の対応する値の間のマッピングを示している。

注：相関値は元々のマゼラン方式に従ってラベルづけられている；(すなわち $C_0 \equiv C^k_{0,0}$ 、 $C_1 \equiv C^k_{1,0}$ など)。

【0088】ナビゲーション問題への効率的解析解 一般的線形最小2乗法による解法

実際問題として、高解像度の相関表面への数値的最小2乗法の適用はリアルタイムで実行することはできない。

その代わりに、各用紙繊維比較イメージがナビゲーション機構によって捕捉された後、相関ボウルは、規則正しく定義されたグリッドに関して(以前に捕捉された基準イメージに対して)相関関数 $C_{i,j}^k$ を計算することによってサンプリングされる。例えば、 $i,j \in \{-1,0,1\}$ は9つの相関数を含む 3×3 正方形のグリッドを生成する。この場合 $C_{0,0}^k$ が中央のセルに位置する。次に、ナビゲーション機構によって生成されるピクセルシフト相関データのこの限られたセットを表現することができる"最善の"2次モデルを見つけ出すという一般的問題を考察する。元々のマゼラン方式に従って(但し $C_0 \equiv C_{0,0}^k$ 、 $C_1 \equiv C_{k,-1,0}$ 等々の) 3×3 相関グリッドのケースに関して、このモデルが図18によって表されている。 $f(x,y)$ が差の自乗和相関データを可能な限り正確にモデル化することを可能にするように係数 $\{a_m\}$ に対する値が見出されなければならない。

【0089】6つの係数および9つの相関値が存在するので、ナビゲーション問題に対する純粋に代数的手法は、解を得るため、グリッドにおける9つのデータ・ポイントからの選択を必要とする。本発明は、最小2乗法

$$\begin{aligned} x^2 = & [C_0 - f(0,0)]^2 + [C_1 - f(-1,0)]^2 + [C_2 - f(-1,1)]^2 \\ & + [C_3 - f(0,1)]^2 + [C_4 - f(1,1)]^2 + [C_5 - f(1,0)]^2 \\ & + [C_6 - f(1,-1)]^2 + [C_7 - f(0,-1)]^2 + [C_8 - f(-1,-1)]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

【0092】 $f(x,y)$ は係数 $\{a_m\}$ の線形関数であるので、 x^2 はこれら変数パラメータの非線形関数である。

【0093】 $f(x,y)$ の9つの相関値 $\{C_0 \dots C_8\}$ への数値的適合は、また、リアルタイム・システムにおいて実際のではない。 x^2 の最小値において、パラメータ・セット $\{a_m\}$ のメンバに関する勾配は同等に消滅しなければならない；

$$(\delta / \delta a_m) x^2 = 0 \quad (10)$$

【0094】それゆえ、6つの未知のパラメータにおける6つの独立した方程式が得られる。このプロシージャは、Mathematicaのようなコンピュータ代数パッケージを使用して容易に実施できる。 3×3 相関グリッドのケースに関して次のような値が得られる；

$$a_{00} = 1/9[5C_0 + 2(C_1 + C_3 + C_5 + C_7) - (C_2 + C_4 + C_6 + C_8)] \quad (11a)$$

$$a_{10} = 1/6[(C_4 + C_5 + C_6) - (C_1 + C_2 + C_3)] \quad (11b)$$

$$a_{01} = 1/6[(C_2 + C_3 + C_4) - (C_5 + C_7 + C_8)] \quad (11c)$$

$$a_{11} = 1/4[(C_4 + C_8) - (C_2 + C_6)] \quad (11d)$$

$$a_{20} = 1/6[(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6) - 2(C_0 + C_3 + C_7)] \quad (11e)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} f(x,y) \right|_{[x,y] \rightarrow [x_0,y_0]} = \left. \frac{\partial}{\partial y} f(x,y) \right|_{[x,y] \rightarrow [x_0,y_0]} = 0. \quad (12)$$

【0097】ここにおいて、候補最小値の位置として直接式(8a)および式(8b)を生成する、2つの未知の $\{x_0, y_0\}$ における2つの式が得られている。楕円放物面モデルにおいて、 $f'(x',y')$ の最小値は起点において発生するので、 $f(x,y)$ の最小値は $\{x_0, y_0\}$ に位置する。この点

適用という既知の方法を使用する。これは、相関データにおける装置上および統計的誤差の両方が独立して正規分布に従うとすれば適用されるパラメータの最大同一性推定の方法に等しい。原理的には、較正されたピクセル輝度測定値だけが使用されることを保証し、従って相関数の計算に及ぼす体系的誤差の影響を最小にするように注意が払われていれば、相関データ値はこれらの仮定を満たす。

【0090】実際問題として、(各相関セルについて平均として同じものでなければならない)そのような誤差を測定することは難しく、いかなるケースにおいても、ナビゲーション・システムにおいて位置決定のため割り当てられる短い時間にそれらが役立つか否かは明らかではない。従って、本発明は、相関値の間の差の平方の総和を単に表すように x^2 を変換することによって、そのような誤差を無視する。従って、対応するモデルの推定は $f(x,y)$ を使用して次式(9)のようになる。

【0091】

【数5】

$$a_{02} = 1/6[(C_2 + C_3 + C_4 + C_6 + C_7 + C_8) - 2(C_0 + C_1 + C_5)] \quad (11f)$$

【0095】注意すべきは、各係数は、9つの相関値 $\{C_0 \dots C_8\}$ の単純でユニークな線形結合として表わされている。 x^2 が定義によって正の限定された値であるので、この解はユニークな最小値を表すにちがいない。検証すれば、ヘッシアン・マトリックスの固有値は $\{2, 4, 8, 12, 12, 36\}$ であり、これらはすべて正の定数であるので、得られる値はまさにユニークな最小値であることが判明する。

【0096】既述のように、式(11b)一式(11f)を使用して計算された係数を式(8a)一式(8b)に代入して、並進運動 x_0 および y_0 を取得することができる。しかしながら、なにがしか一層公式的に処理することによって、有用な妥当性テストを展開することができる。前述のように、次式(12)の通り直角座標 (x,y) に関する勾配が $\{x_0, y_0\}$ において消滅することを保証することによって $f(x,y)$ の最小値が求められる；

【数6】

$$= 0. \quad (12)$$

は、次式(13)としてヘッシアン・マトリックスのエレメントを計算することによって更に調べられることができる。

【0098】

【数7】

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x, y) & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} f(x, y) \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} f(x, y) & \frac{\partial^2}{\partial y^2} f(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2a_{20} & a_{11} \\ a_{11} & 2a_{02} \end{bmatrix} \quad (13)$$

但し、 H の固有値は、

$$\lambda_{\pm} = a_{20} + a_{02} \pm [(a_{20} - a_{02})^2 + a_{11}^2]^{1/2} \quad (14)$$

である。両方の固有値が正(負)であれば、 $f(x_0, y_0)$ は最

$$a_{20} + a_{02} > [(a_{20} - a_{02})^2 + a_{11}^2]^{1/2} \quad (\text{最小値の場合}) \quad (15a)$$

$$a_{20} + a_{02} < -[(a_{20} - a_{02})^2 + a_{11}^2]^{1/2} \quad (\text{最大値の場合}) \quad (15b)$$

しかし、これらの制約は次式(16)、(17a)、(17b)のよう

小(最大)である。固有値が対立する符号を持つならば、表面はサドル型である。従って、最小値は次式(15a)、最大値は次式(15b)となる；

な計算処理可能な一層単純な条件と同等である；

$$\text{Det}(H) = \lambda_+ \lambda_- = (a_{20} + a_{02})^2 - [(a_{20} - a_{02})^2 + a_{11}^2] = 4a_{20} a_{02} - a_{11}^2 > 0 \quad (16)$$

$$a_{20} + a_{02} > 0 \quad (\text{最小値の場合}) \quad (17a)$$

$$a_{20} + a_{02} < 0 \quad (\text{最大値の場合}) \quad (17b)$$

【0099】 $f(x, y)$ が $\{x_0, y_0\}$ において最小であることが要求されるので、診断条件(16)および(17)は実行時ナビゲーション・システムに組み込まれる。この条件が満たされなければ、相関表面は理想的な楕円放物面形状から大きく乖離し、位置測定を行うため、以下に記述される予測値クラスのメンバが使用される。

【0100】図19の(A)は、2次式相関関数および図14の用紙サンプルを使用して各データ座標について得られる相関数 $\{C_0, \dots, C_8\}$ に式(8a)、(8b)および式(11b)～(11f)(以下アルゴリズム“9A”と呼ぶ)を適用した結果得られるナビゲーション誤差を表す。各誤差ベクトルは、既知の真の位置からアルゴリズムを使用して計算された位置を指し示す。起点の近くのアロリズムの性能は全く良好であるが、ナビゲーション誤差は、起点からの距離と共に非線形に増加し、距離が1ピクセルに接近すると誤差は数百のピクセルの長さまで及ぶ。この問題の原因は、数値的には、式(8a)および(8b)における分母 $4a_{20} a_{02} - a_{11}^2$ にある。この分母は、起点からの距離とともに著しく減少し、最後に、1ピクセルを超える距離において妥当性条件(16)を充足しなくなる。この性能の低下は部分的に次のようにして克服することができる。まず、 $i, j \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ によって定義される正方25セルグリッドに対して $C_{i,j}$ を計算する。次に、以下に既述されるように導出される予測値のクラスの適切なメンバを使用して、表面最小値を含むセルを特定し、このセルを中心とする9つの相関数をアルゴリズムに入力として渡す。

【0101】図19の(B)は、この手法の使用を仮定した場合の改善を示している。この結果は好ましいものではあるが、異なる用紙サンプルが中心の平方ピクセルの範囲内でアルゴリズムを使用して有限ナビゲーション誤

差を生成するか否かは依然として不明であり、非線形誤差が後述されるような効果的リアルタイム補正を可能にするか否か明らかでない。加えて、このような誤差の線形化を可能にするアルゴリズム“9A”への修正が考察される。

【0102】図19の(A)および(B)は、2次式相関関数および図14の紙サンプルを使用して各データ座標について得られる相関数 $\{C_0, \dots, C_8\}$ にアルゴリズム“9A”を適用した結果得られるナビゲーション誤差を表す。各誤差ベクトルは、既知の真の位置からアルゴリズムを使用して計算された位置を指し示す。図19の(A)において、誤差ベクトルは、起点からの距離が1ピクセルに接近すると、数百ピクセルの大きさに成長する。図19の(B)においては、以下に既述される予測手法の使用が仮定されている。

【0103】相関表面のテーラー級数表現

楕円放物面に対するアフィン変換の効果を考慮することによって $f(x, y)$ という2次形式の選択が動機を与えられたけれども、同じ手法を一般化して、近傍の最小値(または最大値)の相関関数に応用することが可能である。 $\{\text{ポイント } r_0 \equiv \{x_0, y_0\} \text{ において値 } g(x_0, y_0) \text{ を持つ任意の } 2 \text{ 次元関数を考察する。このポイントの近傍において、値 } g(x_0, y_0) \text{ の小さい変位ベクトル}$

【数8】

$$r = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

の効果が、次式(18)のテーラー級数展開式によって、公式として、与えられる。

【0104】

【数9】

$$\begin{aligned}
g(x_0 + x, y_0 + y) &\equiv \exp[d_{r0}(r)]f(x_0, y_0) \\
&= f(x_0, y_0) + df_{r0}(r) + \frac{1}{2}d^2 f_{r0}(r) + O(|r|^2) \\
&= f(x_0, y_0) + df_{r0}(r) + \frac{1}{2}r^T H(x_0, y_0)r + \dots \\
&= f(x_0, y_0) + x \frac{\partial}{\partial x_0} f(x_0, y_0) + y \frac{\partial}{\partial y_0} f(x_0, y_0) \\
&\quad + \frac{1}{2}x^2 \frac{\partial^2}{\partial x_0^2} f(x_0, y_0) + xy \frac{\partial^2}{\partial x_0 \partial y_0} f(x_0, y_0) \\
&\quad + \frac{1}{2}y^2 \frac{\partial^2}{\partial y_0^2} f(x_0, y_0) + \dots \\
&\equiv a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2
\end{aligned} \tag{18}$$

【0105】このようにして、2次モデル関数(6)の選択は、対象領域において“真の”相関表面がテラレー級数展開式によって正確に表示されることができるとする仮定と同一である。大きい変位によってこの仮定が満たされない場合、上記アルゴリズムによって計算される並進運動ベクトルは信頼できない。従って、 $f(x, y) \equiv g(x_0 + x, y_0 + y)$ によって記述される2次表面から相関表面が大幅に乖離し始めるため、図19の(A)および(B)に示される起点からの距離にともなうナビゲーション誤差の非線形増加の原因が発生する。実際、図20の(A)および(B)に示されているように、起点の近くの合致は合理的ではあるが、距離が離れると真の表面は式(18)によって与えられる2次近似から大幅に乖離し始める。

【0106】基本的2次ナビゲーション・アルゴリズムしかしながら、楕円放物面としての相関表面のモデルは長所がないわけではない。基本ナビゲーション・アルゴリズムに対する修正を考慮すれば、大きい変位の場合にもその正確度を改良することが可能である。例えば、方程式(7a)および(7b)を分析すれば次の点が判明する。楕円放物面の場合、相関表面(a_{11} 、 a_{20} および a_{02})の2次形状を決定する係数は並進運動ベクトル $\{x_0, y_0\}$ のコンポーネントに依存しない。従って、並進運動に先立ち相関表面の形状を先ず決定し、次に、並進運動の発生の後その形状を保持することによってアルゴリズムの妥当性範囲が拡張される。公式化すれば、この方法は次のステップからなる。

1. 基準フレームが取得された直後に得られる自己相関データに式(11d)～(11f)を適用することによって(a_{11} 、 a_{20} および a_{02})を計算する；

2. 後続の用紙繊維イメージの各々が、捕捉された比較フレームへロードされた後、比較および基準フレームを交差相関させることによって得られるデータに式(11b)および(11c)を適用することによって a_{10} ならびに a_{01} を計算する；

3. 値 a_{10} ならびに a_{01} および自己相関データから計算さ

れる値(a_{11} 、 a_{20} および a_{02})を式(8a)および(8b)に代入して現在時イメージの並進運動座標を取得する；

4. 各基準フレームが取得された後このプロセスを繰り返す。

【0107】数値的に便利のように、以下の変換式によって式(6)の係数に関連づけられるパラメータ $\{b_m\}$ が使用される；

$$b_{10} \equiv 6a_{10} \tag{19a}$$

$$b_{01} \equiv 6a_{01} \tag{19b}$$

$$b_{11} \equiv 6a_{11} \tag{19c}$$

$$b_{20} \equiv 12a_{20} \tag{19d}$$

$$b_{02} \equiv 12a_{02} \tag{19d}$$

【0108】図20の(A)および(B)は、最適合致2次表面と2次式相関関数($k=2$)および図14のデータセットを使用して計算される真の相関表面の間の相違を示している。相違は、データセットにおける相関表面の最大値によって尺度を縮小されている。ほとんどのケースにおいて、 $\{a_m\}$ ではなく $\{b_m\}$ の使用が比較的少ない外部の定数を持つ比較的単純な表現を生む。

【0109】図21の(A)および(B)は、2次式相関関数ならびに用紙サンプルを使用して得られる相関関数 $\{C_0, \dots, C_8\}$ へのアルゴリズム“9B”の適用によって発生するナビゲーション誤差を示している。図19の(A)および(B)の場合と同様に、各誤差ベクトルは既知の真の位置から計算された位置を指し示し、予測手法の使用が以下に既述されるように仮定されている。この場合もまた、起点の近くのアルゴリズムの性能は極めて良好であり、また、方程式(8a)および(8b)の分母は固定されているので、誤差は起点からの距離に対して非線形に増大しない。それにもかかわらず、アルゴリズム“9B”は、真の位置ベクトルのデカルト座標コンポーネントをナビゲーション機構が起点から離れるように動く際徐々に増加する量だけ明らかに低く推定する。この誤差の徐々に増大する性質のため、アルゴリズム“9B”の3つの修正がアルゴリズムの性能の劇的改善を提供する。

20

30

40

50

【0110】ナビゲーション性能改善の方法

基本的ナビゲーション・アルゴリズムの性能の改善方法には2つのクラスがある。第1の比較的一般的方法として、相関表面、すなわち9つの相関数 $\{C_0, \dots, C_8\}$ が最適化係数 $\{b_m\}$ およびその後の変位 $\{x_0, y_0\}$ の計算に先立って修正される。このケースでは、新しい相関関数が相関データのリアルタイム計算のため選択され、また、データは、相関器によって生成された後、作り直される。目標は、2次テラレー級数近似が一層効果的表現の役目を果たすことができるように相関表面の形状を直接修正することである。第2の、一層具体的な方法としては、ナビゲーション・システムへの報告に先立って誤差の大部分が取り除かれることを可能にする補正関数(または照合テーブル)を構築するため、実行時にアルゴリズムによって生成される位置推定が使用される。この手法は、補正関数/テーブルのリアルタイム構築のための方法を必要とする。

【0111】立方体相関関数

最初に、一層接近した2次表面を生成する相関関数が必要である。例えば、 $(k=1)$ である式(1)によって与えられる線形相関関数がパスファインダ(Pathfinder)ROMに組み込まれる。しかしながら、図22の(A)および(B)に示されるように、実際に、線形相関関数は、図20の(A)および(B)において示される2次式相関関数の場合に比較して2次近似で表現するのが一層困難な表面を生成する。従って、この相関表面へのアルゴリズム"9B"の適用から生じるナビゲーション誤差は、図23の(A)および(B)に示されているように、図21の(A)および(B)に表されている誤差より大きい。今や、ナビゲーション機構は、起点からの真の距離を、2次式相関関数の場合より大幅に大きい量低く推定している。

【0112】かくして、立方体相関関数は2次関数によって生成されるものより小さい誤差を生成する。図25を図21と比較すれば、図14のデータセットに関してテラレー級数近似(18)によって立方体を一層正確に表現することができることがわかる。実際、図25の(A)および(B)におけるナビゲーション誤差の対応する低減は劇的である。顕著な残存誤差がピクセル間の境界に発生しているだけである。この傾向は4次多項式相関関数では続かない。この場合、ナビゲーション・アルゴリズムは、位置のデカルト座標コンポーネントを過大評

$$C_{mn}^k \rightarrow [C_{mn}^k]^K, \quad K \in \mathbb{R} > 1,$$

【0117】立方体相関関数の使用から生じる偏差への図27(A)の類似性は図11の(A)に示されている点注意する必要がある。当然のことながら、図29の(A)および(B)において示されている対応するナビゲーション誤差は、図25の(A)および(B)に示されている立方体相関関数の場合と同様な劇的改善を表している。この場合もまた、ピクセル境界においてのみ一致は例外的であ

価し始める。kの正確な値をわずかに調整することによって、ピクセル境界での誤差ベクトルの長さにおけるわずかな低減を得ることができるが、このようにして得られるkの最終値は、3から大幅に異なることはなく、テスト中の特定の用紙サンプルに非常に依存する可能性が高い。このようにして、組み込まれる立方体相関関数は、リアルタイム・ナビゲーションの性能の大幅な改善を提供する。

【0113】相関表面の再作成

10 実行時に相関器によって出力される25(または9)の相関関数の集合を所与とすれば、座標従属非線形マッピング関数をこれらデータに適用して、2次テラレー級数近似(18)によって一層正確に表示されるように表面形状を変更することができる。この手法の選択は、起点からの距離が増加すると共に2次式から大幅に乖離する1次元関数を非線形マッピングが持つような効果を検証することによって動機を与えられる。図26の(A)および(B)において、相関ボウルを通過する1平面スライスが関数 $C(x) = 1 - \exp(-3x^2/2)$ によって近似されている。

20 【0114】関数 $C(x)$ は、起点からの距離と共に2次式より遅く増加するという点において、2次式相関関数によって生成される真の表面と同様に動作する。図27の(A)に示されるように、このシミュレートされた"データ"への最適化2次関数は $C(x)$ のむしろ貧弱な表現であり、図20の(A)および(B)において示される2次モデル関数の特定の数値的欠陥を共有する。すなわち、それは起点の近くで大きすぎ、特に、xの増加と共にデータの非対称動作を模倣することができない。しかしながら、図26の(B)において、単純な非線形マッピング $C'(x) = C(x)^{3/2}$ を使用してデータの形状を変更することによって、シミュレートされたデータと2次モデルの間の一致 $(-1 < x < 1)$ の範囲内において)は大幅に改善される。(注: 起点近くの最適化2次式の小さい負の偏差は、 $k=3$ のケースに関して図24の(A)および(B)において示される2次モデル関数に類似している)。

【0115】次式(20)によって与えられる単純な実際非線形マッピングは、相関表面の形状を変更して、2次テラレー級数近似(18)が一層正確にデータを表現することを可能にする。

【0116】

【数10】

$$(20)$$

る。このような境界において、残存誤差ベクトルの長さは分調整をkの値に対して行うことによって減少させることができるが、その結果のkの最終的値は多種多様な用紙サンプルにあてはまる可能性は少ない。

【0118】原理的には、立方体相関関数から発生する表面さえも形状変更することができる。しかしながら、実際には、Kはこの場合1単位の大きさも乖離しないの

で、性能改善はほとんど認識できない。従って、 $k=3/2$ として単純な実非線形マッピング(20)を使用するボウル形状変更は、立方体相関関数の使用に対する許容可能な代替方法である。ただし、この方法は、後刻ナビゲーション・プロセスに適用され、従って、テスト中の用紙繊維サンプルに一層依存するので、あまり一般的ではない。

【0119】事後処理線形補正

アルゴリズム"9B"において、基準フレームが最初に取得され次に後続の比較フレームに対して固定された後、3つの係数 b_{20} 、 b_{02} および b_{11} によって表されるボウル形状が決定される。この場合、分母 $b_{20}b_{02}-b_{11}^2$ は一定に保たれ、 $\{x_0, y_0\}$ は b_{10} から b_{01} までの9つの相関関数に線形に依存する。従って、アルゴリズム"9B"の使用から起こるナビゲーション誤差は、図21の(A)および(B)において示されるように $\{x_0, y_0\}$ の計算された値において線形である。従って、位置がアルゴリズム"9B"を使用して計算された後 $\{x_0, y_0\}$ において線形である相関関数が見出されて適用される。定義によって、これらの線形関数は次式(21a)および(21b)という形式を持つ；

$$\Delta x(x_0, y_0) = p_{00} + p_{10}x_0 + p_{01}y_0 \quad (21a)$$

$$\Delta y(x_0, y_0) = q_{00} + q_{10}x_0 + q_{01}y_0 \quad (21b)$$

図21の(B)に表示される中心ナビゲーション誤差に対するデル関数(21a)ならびに(21b)の線形最小2乗適合を実行することによって、次式(22a)および(22b)が得られる；

$$\Delta x(x_0, y_0) = -0.021 - 0.322x_0 - 0.080y_0 \quad (22a)$$

$$\Delta y(x_0, y_0) = 0.004 - 0.028x_0 - 0.348y_0 \quad (22b)$$

【0120】図28の(A)および(B)は、 $x_0 \rightarrow x_0 + \Delta x(x_0, y_0)$ および

$$y_0 \rightarrow y_0 + \Delta y(x_0, y_0)$$

というマッピングを使用して図21(A)に示されている各対応する位置推定値 $\{x_0, y_0\}$ へのこのような補正関数の適用の結果を示している。注：平方根-平均-平方および最大ナビゲーション誤差の両方に顕著な減少がみられる。

【0121】有用な線形補正関数が構築されることを可能にする相関関数 $\{C_0, \dots, C_8\}$ におけるアルゴリズム"9B"の線形性が、この手法をアルゴリズム"9A"の出力に適用して $\{x_0, y_0\}$ を計算する時可変分母 $b_{20}b_{02}-b_{11}^2$ を使用することによって、更に検証される。図30の(A)および(B)に示される結果と図19の(A)および(B)に示される元々のナビゲーション誤差の比較が、この補正がこの場合効果的でないことを説明する。

【0122】完全性のため、立方体相関関数および形状変更された相関表面の両者を使用するアルゴリズム"9B"によって事後処理線形補正がナビゲーション誤差出力に適用されるが、その結果は、図29の(A)および(B)に示されるものよりさほど改善されていない。一見、このようなその他の性能改善手法は不必要であるようにみえ

るが、図14の用紙サンプルに関して得られる特定の補正関数(22a)および(22b)はその他の用紙サンプルに対して同様に使用できることはほとんどあり得ない。補正係数 $\{p_m\}$ および $\{q_m\}$ は、うまく定義される関数形式を通して2次ボウル形係数 b_{20} 、 b_{11} および b_{02} に依存する。ナビゲーション問題に対する最も一般的解決策は、アルゴリズム"9B"を立方体相関関または形状変更ボウルのいずれかに適用し、基準フレームが取得された後計算される2次表面形状係数を使用して実行時に決定される係数を用いて線形補正関数を適用することである。

【0123】減少されたデータセットを使用する並進運動計算

上述の修正に対する減少された範囲の代替方法セットの詳細な導出は、図31に示される並進運動の検証を必要とする。最も最近のマイクロステップの起点を中心とする平方ピクセルの境界内に変位は制限されるが、変位は2次テーラー級数近似(18)が有効でなくなるほど大きい。セル0、3、4および5の相関データは式(18)による正確な表現を可能にするかもしれないが、 3×3 アレイにおけるその他の5つのセルはそうではない。アルゴリズム"9B"に対する2つの拡張ファミリが存在する。すなわち、x軸ならびにy軸に近い大きい変位に対する使用のための6セル・アルゴリズム、および、平方ピクセル境界のコーナーへの偏位運動のための4セル方法という2つである。

【0124】6セル・ナビゲーション・アルゴリズム

減少範囲データセットを使用する並進運動計算に対する本発明の手法は、それが最小2乗法に基づいているという点において全9セル・アルゴリズムに関するものと本質的に同じである。しかしながら、正のx軸に近い中心セルの範囲内の大きい並進運動の6セル・ケースに関して図32の(A)に示されているように、2次近似を最も満たしそうな相関セルに対してのみ平方偏差を総和することによって x^2 が得られる。

【0125】更に、ボウルの形状は一定であり、最も最近のマイクロステップの直後に収集される自己相関データから計算される b_{11} 、 b_{20} および b_{02} という値が保持され、値 b_{10} および b_{01} のみの変化が許容される。図32の(A)に示されるケースにおいて、 b_{10} および b_{01} は次式(23a)および(23b)の通りである；

$$b_{10} = 2[(C_4 + C_5 + C_6) - (C_0 + C_3 + C_7)] - 1/2^*b_{20} \quad (23a)$$

$$b_{01} = 3/2^*[(C_3 + C_5) - (C_6 + C_7)] - 1/2^*b_{11} \quad (23b)$$

これらの係数は、次に、式(8a)ならびに(8b)へ直接代入され、変位ベクトル $\{X_0, Y_0\}$ が得られる。その他の3つの6セル・データ・サブセットに関する計算は、図42の(A)ならびに(B)、および図43の(A)ならびに(B)にリストされている。

【0126】4セル・ナビゲーション・アルゴリズム

図32の(B)に示されているような、右上象限に近い中心セルの範囲内で大きい並進運動が発生する4セル・ケ

ースに関する同様の計算が次式(24a)並びに(24b)の線形係数を生成する；

$$b_{10} = 3[(C_4 + C_0) + (C_5 - C_3)] - 1/2 * (b_{20} + b_{11}) \quad (24a)$$

$$b_{01} = 3[(C_4 + C_0) - (C_5 - C_3)] - 1/2 * (b_{02} + b_{11}) \quad (24b)$$

図32の(A)ならびに(B)は、減少されたデータセット・セルのマッピングの例を示す。図32(A)は、正のx軸の近くの中心セルの範囲内の大きい並進運動に関する図18において示された9セル・マッピングの6セル減少を示す。X²は、図示されている6つの右側セルだけの

$$x_0 = 1/2 - 3[(b_{02} - b_{11}) (C_4 - C_0) + (b_{02} + b_{11}) (C_5 - C_3)] / (b_{20} b_{02} - b_{11}^2) \quad (25a)$$

$$y_0 = 1/2 - 3[(b_{20} - b_{11}) (C_4 - C_0) + (b_{20} + b_{11}) (C_5 - C_3)] / (b_{20} b_{02} - b_{11}^2) \quad (25b)$$

その他の3つの象限に関する計算は、図42の(A)ならびに(B)、および図43の(A)ならびに(B)にリストされている。

【0128】効果的位置予測値のクラス

図19の(A)ならびに(B)に示されているように、上述示されたナビゲーション・アルゴリズムは、特定マイクロステップの起点を中心とする1平方ピクセルの範囲内に変位が限定される場合に、最も正確である。言い換えると、(5×5セル・グリッドにおいて)その最小値を含むセルが識別されることができると十分な正確性を持つ相関表面の最小値の位置を前もって予測して、次に、このセルを中心とする9つの相関数をナビゲーション・アルゴリズムへの入力として選択することが望ましい。原理的には、25セル・グリッドにおいて最小相関値を含むセルが識別され、表面極小がこのセルに位置していると推定される。図33の(A)および(B)は、2次式相関関数(k=2)ならびに図14の用紙サンプルを使用して得ら

$$\begin{aligned} p_n(t_k) &= \sum_{j=0}^n \gamma_j r_k^j = \sum_{j=0}^n b_j \Delta t^j k^j \\ &= \sum_{j=0}^n \alpha_j k^j, \end{aligned}$$

但し、n<∞である。多項式の次数nは、ナビゲーション機構の真の運動が予測される正確度を決定する。例えば、n=2の選択は、次式【数12】という仮定と同義語である。

【0131】

【数12】

$$|f(t)| < |f(t)| / \Delta t$$

$$x_{n,n}^2 = \sum_{k=-n}^n [x_k - p_n(t_k)]^2$$

式(27)の最小値において、パラメータ・セット{α_j}のメンバに関する勾配は、次式(28)に従って同等に消滅しなければならない。

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_j} x_{n,n}^2 = 0, \quad j \in \{0, \dots, n\}.$$

従って、n+1の独立の方程式がn+1の未知のパラメータに

合計によって計算される。図32の(B)は、図31に示されるような右上象限の近くの中心セルの範囲内の大きい並進運動に関する図18において示された9セル・マッピングの4セル減少を示す。X²は、図示されている4つの右上セルだけの合計によって計算される。

【0127】式(8a)ならびに(8b)に代入すれば、次式(25a)ならびに(25b)のような並進運動コンポーネントを得る；

れる相関数およびこの“極小セル”予測値へのアルゴリズム“9B”の適用の結果生まれるナビゲーション誤差を表している。注：ピクセル境界の近くには、電子回路ノイズに起因する相関値の変動によって生じる偽の位置計算が頻繁に発生する。

【0129】線形最小2乗法による解決手法

上記の代わりに、上記導入された最小2乗法に基づく単純な線形予測アルゴリズムのクラスが、以前のフレームの既知の座標を使用して次のフレームの変位座標を推定するように設計される。共通の空間上の起点を共有し時間的に一様にサンプルされる(すなわちt_k=kΔt、k∈{-m, ..., -1}である)m個の位置測定値{r(t_{-m}), ..., r(t₋₁)}を所与として、時間t₀=0における推定値が求められる。xならびにy座標の時間に対する関数依存性は、次の式(26)の多項式としてモデル化される。

【0130】

【数11】

(26)

ノイズがなければ、nの増加は、式(26)がr(0)を予測する忠実性を常に増加させる。各位置測定は、同じ標準偏差σ₀によって特徴づけられる統計的誤差によって制限され、x₂は、mならびにnの各選択毎に次式(27)として定義される。

【0132】

【数13】

(27)

【0133】

【数14】

(28)

において得られる。それらはp_m(0)=α₀を得るように代数

的に解を得ることができる。そのような解 $p_n(0)=\alpha_0$ の各々は、 m 個の過去の位置測定の線形結合であり、そのため、時間 $t_0=0$ における予測される位置は、次式(29)の形式を持つ。但し、定数 $\{\beta_k\}$ は α_0 に対する解から単純

$$r_{\alpha,p} = \sum_{k=-m}^{-1} \beta_k r_k, \quad (29)$$

【0135】シミュレーション結果および精度／正確性妥協

4つの過去の位置測定値(すなわちタップ)を使用して、次式(30)の多項式によって予測される位置とこれらの測定値の間の平方偏差の総和を最小にする2次多項式が導出される；

$$r_{4,2} = (1/4) * (3r_{-4} - 5r_{-3} - 3r_{-2} + 9r_{-1}) \quad (30)$$

図34の(A)および(B)は、シミュレーションされた位置データと予測値 $x_{4,2} \equiv x \cdot r_{4,2}$ の対応する出力の比較を示している。ゼロ平均を持つガウス・ノイズおよび0.05という標準偏差を関数 $\cos(\pi t)$ に加算し、次にその関数を(間隔あたり40のサンプル・ポイントを所与として)時間間隔 $\Delta t=0.05$ でサンプリングすることによって、シミュレーションされたデータが生成される。図34の(A)は、ノイズのあるサンプルにおける変動を $x_{4,2}$ がどのように追跡することを試みるかを示し、図34の(B)は、このノイズが予測値の出力とその基礎をなす

$$\sigma_{m,p}^2 = \sigma_0^2 \sum_{k=-m}^{-1} \left(\frac{\partial}{\partial x_k} x_{m,p} \right)^2 = \sigma_0^2 \sum_{k=-m}^{-1} \beta_k^2. \quad (31)$$

【0138】式(30)によって与えられる予測値に関して、 $\sigma_{4,2} = 31^{1/2} \sigma_0 / 2 = 2.8 \sigma_0$ である。図35の(A)によって暗に示されるように、一層多数の前の位置測定値を使用することによってこの不確実性を減少させることができる。例えば、 $\sigma_{8,2} = (109/5)^{1/2} \sigma_0 = 1.4 \sigma_0$ である。しかしながら多項式の次数を $n=4$ に増加させると、図35の(B)に示されているように、不確実性が $\sigma_{8,4} = (1231/56)^{1/2} \sigma_0 = 4.7 \sigma_0$ と増加する。

【0139】この結果は、一層高い次数のモデル多項式が急速に変化するデータの層正確な表現のために選択されるという事実によって説明される。従って、多項式は、電子的ノイズに起因する偽の位置変動に対して層敏感でなければならない。これらの傾向のすべてが図36に明確に示されている。

【0140】線形モデル多項式を使用して一層低い不確実性を達成することも可能であるが、低い次数の多項式は低ノイズ環境においてさえ真の位置変更を正確に予測することができない可能性のあることを認識することは重要である。図37の(A)は、予測値 $x_{8,1}$ の出力を“真”の位置と比較している。この予測値によって生成される正確度は図35の(A)において示された $x_{8,2}$ の不確実性より劣っている点は明らかである。これは、線形モデル多項式が、8つの先行測定によってカバーされる長い時

に読み取られる。

【0134】

【数15】

真の“位置”の間の相違に及ぼす影響を示す。図35の(A)に示されているように、8タップ予測値 $x_{8,2}$ によってかなり良好な性能が提供される。モデル多項式の次数を2から4へ増加させることによって予測値の精度がさらに強化されると考えられるが、図35の(B)は、8タップ予測値 $x_{8,2}$ に関してそのようなことはないことを示している。

【0136】予測値出力の標準偏差を計算することによって、この直観に反した結果を定量化することができる。式(29)によって予測される $x_{m,n}$ または $y_{m,n}$ いずれかの値の精度は、過去の測定における統計的誤差に起因する不確実性によって制限される。連続的測定における統計的誤差は相互に相関しないと仮定されるので、標準誤差伝播式(31)を使用して予測における不確実性 w の計算が可能となる。

【0137】

【数16】

間隔の間 $x(t)$ に関する近似が貧弱なことによる。従って、シミュレーションに対して選択される特定の $x(t)$ およびノイズ・モデルに関して図37(B)に示されるような比較的短い時間間隔をカバーするように以前の測定値の数を減少させることによって正確性を増加させることができる。

【0141】従って、精度増加(すなわち一層低いノイズ反応性)と正確性の間の複雑な妥協は次のように要約される：

*精度は、過去のデータ・ポイント(タップ) m の数の増加と共に、増加し、モデル多項式次数 n の増加と共に、減少する；

*正確度は、モデル多項式次数 n の増加と共に、増加し、過去のデータ・ポイント(タップ) m の数の増加と共に、減少する。

【0142】マクロステップ座標に関する平滑化アルゴリズムのクラス

線形最小2乗法による解法

マクロステップの保存された座標が既知である場合、80マイクロ秒捕捉間隔の倍数で一樣にサンプルされた隣接ポイントの座標を体系的に使用してマクロステップの座標を円滑化することによって、正確性を顕著に増加させることができる。円滑化の手法は上述の予測手法に類

似している。共通の空間上の起点を共有し時間的に一様にサンプルされる(すなわち $t_k = k \Delta t$, $k \in \{-m, \dots, 0, \dots, m\}$ である) $2m+1$ 位置測定値 $\{r(t, m), \dots, r(0), \dots, r(t, m)\}$ からなるセット、 $r(0)$ に対する値を所与とすれば、時間 $t_0=0$ における位置が求められる。この場合も、 x ならびに y 座標の時間に対する関数依存性は式(26)によ

$$x_{m,n}^2 = \sum_{k=-m}^m [x_k - p_k(t_k)]^2$$

【0144】多項式係数 $\{\alpha_j\}$ に関する上式(32)の勾配は同等に消滅する必要がある。この場合もまた、 $n+1$ の未知のパラメータにおける $n+1$ の独立した方程式が得られ、それらは、代数的に $p_n(0) = \alpha_0$ を得るように解かれる。そのような解の各々は、 $2m+1$ の記録された位置測定

$$r_{m,n} = \sum_{k=-m}^m \beta_k r_k$$

【0146】実際には、 $t=0$ に関する過去の測定値の対称配置が、奇数べき乗を持つ式(26)の項によって作成される $r_{m,n}$ (すなわち α_0)に対する貢献を削減する。それゆえ、例えば、 $1 \in \mathbb{Z}_{>0}$ として、 $r_{m,2l+1} = r_{m,2l}$ である。しかし、 $j \in \mathbb{Z}_{>0}$ の場合、一層高次の係数 α_j は一般にユ

ニークである。

$$r_{4,2} = (1/231) [59r_0 + 54(r_1 + r_{-1}) + 39(r_2 + r_{-2}) + 14(r_3 + r_{-3}) - 21(r_4 + r_{-4})] \quad (34)$$

図38の(A)および(B)は、シミュレートされた位置情報と平滑式 $x_{4,2} \equiv x \cdot r_{4,2}$ の対応する出力を比較している。シミュレートされたデータは、ゼロ平均を持つガウス・ノイズならびに0.05という標準偏差を関数 $\cos(\pi t)$ に加算して、次に、(間隔あたり40サンプル・ポイントを所与として)時間間隔 $\Delta t = 0.05$ でその関数をサンプリングすることによって、生成される。

【0148】図38の(A)は、 $x_{4,2}$ の9タップがノイズのあるサンプルにおける変動の典型的サイズをどのようにした大幅に減少させたかを示し、図38の(B)は、基礎をなす"真の"位置が合理的に復元されたことを示している。17タップ平滑式 $x_{8,2}$ によってなおも性能改善が得られることが図39の(A)に示されている。対応する

$$\sigma_{m,n}^2 = \sigma_0^2 \sum_{k=-m}^m \left(\frac{\partial}{\partial x_k} x_{m,n} \right)^2 = \sigma_0^2 \sum_{k=-m}^m \beta_k^2$$

【0151】式(34)によって与えられる平滑式の場合、 $\sigma_{4,2} = (59/231)^{1/2}$ $\sigma_0 = 0.51 \sigma_0$ である。図40は、この計算をより広範囲の例に広げている。注：統計的不確実性への最小の感度は、 $\beta_k = 1/(2m+1)$, $k \in \{-m, \dots, 0, \dots, m\}$ として、単純平均 $n=0$ によって与えられる。しかしながら、1つの測定から次の測定への位置変更を無視することができるほどナビゲーション機構の速度が遅いという極端なケースにおいてのみこの平滑式の正確度は満足できる。例えば、図41の(A)は、17タップ平均(すなわち次数ゼロ)の円滑計算から生じる正確度の大幅な悪化を示す。図41の(B)は、9までタップ数を減らすことによって正確性の改善が達成されることを示し

る $n < 2m+1$ 次の多項式としてモデル化され、各位置測定値は、同じ標準偏差 σ_0 によって特徴づけられる統計的誤差によって制限されると仮定される。 m ならびに n の選択の各々に関する x^2 は次式(32)として定義される。

【0143】

【数17】

(32)

値の線形組み合わせであるので、時間 $t=0$ における位置の平滑化された値は、次式(33)という形式を持つ。

【0145】

【数18】

(33)

【0147】シミュレーション結果および精度/正確度の妥協

例えば、特定のケースにおいて、9つの位置測定値を使用して、これらの測定値と次の多項式(34)を使用して計算される平滑化された位置の間の平方偏差の和を最小にする2次多項式が導出される：

予測値に関するケースと相違して、モデル多項式の次数の2から4への増加が、4次モデル多項式の正確度の増加のため、性能のなんらかの改善を生むことを図39の(B)は示している。

【0149】最後に、統計的誤差に対する感度に起因する $x_{m,n}$ または $y_{m,n}$ いずれかの平滑化された値における不確実性が隣接測定において測定される。連続測定における統計的誤差は相互に相関しないと仮定されるので、次式(35)の標準誤差伝播式を使用することが可能とされる。

【0150】

【数19】

(35)

ているが、(図40に示されているような)ノイズに対する感度の増加という犠牲を払わなければならない。精度の向上(すなわちノイズ感度の減少)と正確性の改善の間の妥協は、本発明によって導出される円滑化アルゴリズムに同等にうまく適合する。

【0152】ナビゲーション経路再構築

基準フレームの説明

ナビゲーション機構/スキャナ・システムにおいて、3つの別々のタイプの4つの主要基準フレームが存在する：

(1)ナビゲーション機構基準フレーム

各々がそれ自身の座標を持つ2つのナビゲーション光検

出器アレイが存在する。ナビゲーション機構の各々の座標系の起点は、対応する光検出器アレイの中心に位置する。図45の(A)および(B)は較正基準フレームに埋め込まれるナビゲーション機構の座標系を示す；

(2)較正基準フレーム。較正基準フレームは本質的にはスキャナ基準フレームである。このフレームにおいて、ナビゲーション機構ならびにCISアレの両者は特定の方向を持つ指定された座標に固定される。較正座標空間は2つの左手単位ベクトル $\{u, v\}$ によって張られる。これら2つのベクトルは、ナビゲーション機構1の起点をナビゲーション機構2の起点へ結ぶベクトルに対してそれぞれ垂直および平行である。従って、いかなるベクトルも、較正フレームにおいて $r=uu+vv$ によって表現されることができる。ナビゲーション機構1の基準フレームの起点は $r=0$ (較正フレームの起点)に位置し、一方、ナビゲーション機構2の基準フレームの起点は $r=Dv$ に位置する。ナビゲーション機構1の座標系の軸は、較正フレームの軸に対して角度 θ_1 傾き、ナビゲーション機構2の座標系の軸は、較正フレームの軸に対して角度 θ_2 傾いている。注：図45において回転角度 θ_1 ならびに θ_2 は正として示されているが、図46においては負として示されている。

【0153】用紙基準フレーム

超小型軽量スキャナが最初に紙の上に置かれ始動される時、較正フレームは走査されるべき表面の基準フレームと一致する。この時、第1ならびに第2のナビゲーション光検出器アレイの起点の座標は、較正ならびに紙基準フレームの両方においてそれぞれ $\{0,0\}$ および $\{0,D\}$ である。しかしながら、図46の(B)に示されるように、走査の間の後の時間に、較正フレームは用紙フレームに対して平行移動および回転する。これは2つの定数左手単位ベクトル $\{x_p, y_p\}$ によって張られる。ナビゲーション機構1ならびにナビゲーション機構2のフレーム起点は、一般に、 $\{x_{p1}, y_{p1}\}$ ならびに $\{x_{p2}, y_{p2}\}$ に位置する。それゆえ、図47に示されるように、紙基準フレームにおける較正単位ベクトル u, v のコンポーネントは、次のように計算される。

【0154】(a)ベクトル差 $\Delta r = r_{p2} - r_{p1}$ を計算し、次にその結果をDによって除算して v を求める；

(b) $x_{p2} = x_{p1}$ および $y_{p2} - y_{p1} = D$ であるとして、 v に直角で x_p に等しい単位ベクトル u を発見する；かくして、次の(36a)ならびに(36b)の変換式が得られる；

$$u = [(y_{p2} - y_{p1})/D]x_p - [(x_{p2} - x_{p1})/D]y_p \quad (36a)$$

$$v = [(x_{p2} - x_{p1})/D]x_p + [(y_{p2} - y_{p1})/D]y_p \quad (36b)$$

【0155】従って、単にナビゲーション・アレイの既知の位置および式(36a)ならびに(36b)を使用して用紙フレームにおける u ならびに v の両者を表すことによって、較正フレームにおいて $r=uu+vv$ によって表現されるいかなるベクトルも用紙座標において三角法を用いずに書き

$$(\Delta v_2 - \Delta v_1)^2 + 2D(\Delta v_2 - \Delta v_1) + (\Delta u_2 - \Delta u_1)^2 = 0$$

直すことができる。

【0156】ナビゲーション機構→フレーム較正フレーム

較正フレーム座標に関して2つのナビゲーション機構の各々によって記録される変位を表す変換を決定する際に、2つの光検出器アレイの両方のそれぞれの倍率、およびナビゲーション機構2の右手座標系を考慮しなければならない。最初に、図45の(A)を参照すれば、較正フレームにおけるナビゲーション機構1の変換ベクトル $\{\Delta u_1, \Delta v_1\}$ のコンポーネントが、計算されたナビゲーション機構変位ベクトル $\{\Delta x_1, \Delta y_1\}$ という観点から計算される。回転角度 θ_1 は製造の時点で固定される定数であり、従って、ナビゲーション1から較正フレームへ座標変換は、一定の2次元回転マトリックスを使用して実行することができる。次に、その結果がナビゲーション1の無次元の一定の拡大率 m_1 によって拡大され、次式(37a)ならびに(37b)が得られる。但し、 $c_1 = \cos \theta_1$ 、 $s_1 = \sin \theta_1$ である；

$$\Delta u_1 = m_1 (c_1 \Delta x_1 + s_1 \Delta y_1) \quad (37a)$$

$$\Delta v_1 = m_1 (-s_1 \Delta x_1 + c_1 \Delta y_1) \quad (37b)$$

同様に、ナビゲーション機構2に関して、次式(38a)ならびに(38b)が得られる。但し、 m_2 はナビゲーション2の無次元の一定の拡大率、 $c_2 = \cos \theta_2$ である；

$$\Delta u_2 = m_2 (c_2 \Delta x_2 + s_2 \Delta y_2) \quad (38a)$$

$$\Delta v_2 = m_2 (s_2 \Delta x_2 + c_2 \Delta y_2) \quad (38b)$$

注：ナビゲーション機構2の極性反転が Δy_2 の符号の変更によって暗黙裡に考慮されている。

【0157】 m_1 、 m_2 、 c_1 、 s_1 、 c_2 および s_2 は製造時に較正(例えば固定または測定)することが可能であり、それらの適切にデジタル化された値をROMに組み込むことは可能である。式(37a)ー(38b)は、拡大倍率定数を3角法定数に吸収することによって、また、式(36a)ならびに(36b)の明示的除算を削除するためこれらの定数の中に $1/D$ という別の因子を吸収することによって、更に単純化することができる。

【0158】較正フレーム→用紙フレーム

較正フレーム座標で表されるナビゲーション変換ベクトルを所与とすれば、用紙基準フレームにおける各ナビゲーション機構の起点の位置は、上述の手法を使用して更新される。最初に、較正フレームにおけるナビゲーション機構起点の計算された位置に動的に適用することができる有用な制約式が開発される。

【0159】図48に示される較正フレームにおいて、ナビゲーション機構1ならびに2の並進運動した起点の座標は、それぞれ $\{\Delta u_1, \Delta v_1\}$ 、 $\{\Delta u_2, D + \Delta v_2\}$ である。2つのナビゲーション機構の間の距離は一定のままであるので、次式(39)が成り立つ： $D^2 = (\Delta u_2 - \Delta u_1)^2 + (D + \Delta v_2 - \Delta v_1)^2$ すなわち

$$(39)$$

$(\Delta u_2 - \Delta u_1)^2 \ll D^2$ であるケースにおいて $\Delta v_2 - \Delta v_1$ に関して式(39)を解けば、次式(40)が得られる。

$$\frac{\Delta v_2 - \Delta v_1}{D} \approx -\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_2 - \Delta u_1}{D} \right)$$

【0161】急速な相対的回転という極端なケースにおいては、1/200inほどの大きさの $|\Delta u_2 - \Delta u_1|$ を得ることが可能である。次に、 $D=3\text{in}$ の場合、次式が成り立つ。

【0162】

【数21】

$$D = 3 \text{ in.}, |\Delta v_2 - \Delta v_1| / D \approx 10^{-6}$$

【0163】従って、ナビゲーション機構を分離する距離は一定のままであるという制約は、 $\Delta v_1 = \Delta v_2$ という条件にほぼ等しい。1つの実施形態において、各ナビゲーション機構の並進運動は、ナビゲーション・アルゴリズムの位置予測値モジュールと比較され、次に、予測値に最も近い Δv の値が選択される。代替的には、各ナビゲーション機構の運動(例えば速度と加速度をリアルタイムで計算する)を調べ、次に、(フルモーションの実績に基づいて)正しい変位を与える可能性の高いナビゲーション機構を特定して、対応する Δv を両方のナビゲーション機構に適用することもできる。

【0164】このような調整が行われ、式(40)の基準が

$$x'_{p1} = x_{p1} + (\Delta u_1 / D) (y_{p2} - y_{p1}) + (\Delta v_1 / D) (x_{p2} - x_{p1}) \quad (42a)$$

$$y'_{p1} = y_{p1} + (\Delta u_1 / D) (x_{p2} - x_{p1}) + (\Delta v_1 / D) (y_{p2} - y_{p1}) \quad (42b)$$

$$x'_{p2} = x_{p2} + (\Delta u_2 / D) (y_{p2} - y_{p1}) + (\Delta v_2 / D) (x_{p2} - x_{p1}) \quad (42c)$$

$$y'_{p2} = y_{p2} + (\Delta u_2 / D) (x_{p2} - x_{p1}) + (\Delta v_2 / D) (y_{p2} - y_{p1}) \quad (42d)$$

1/Dという因子を式(37a)において使用される三角法定数に吸収することによって、式(42a)～(42d)は更に簡略化される。

【0166】CIS終端点座標の更新

図46の(A)から、ナビゲーション機構位置が更新された後、CIS終端点の座標は容易に決定することができる。(ナビゲーション機構の位置がCISアレイの終端点に依存しないので、このプロセスは必要に応じてオフラインで実施することができる)。較正フレームにおいて、CIS終端点1ならびに2は、符号付きベクトル $\{a_1, b_1\}$ ならびに $\{a_2, b_2\}$ だけナビゲーション機構1ならび

$$x'_{c1} = x'_{p1} + (a_1 / D) (y'_{p2} - y'_{p1}) + (b_1 / D) (x'_{p2} - x'_{p1}) \quad (44a)$$

$$y'_{c1} = y'_{p1} + (a_1 / D) (x'_{p2} - x'_{p1}) + (b_1 / D) (y'_{p2} - y'_{p1}) \quad (44b)$$

$$x'_{c2} = x'_{p2} + (a_2 / D) (y'_{p2} - y'_{p1}) + (b_2 / D) (x'_{p2} - x'_{p1}) \quad (44c)$$

$$y'_{c2} = y'_{p2} + (a_2 / D) (x'_{p2} - x'_{p1}) + (b_2 / D) (y'_{p2} - y'_{p1}) \quad (44d)$$

上式(44a)～(44d)は、CIS変位定数 a_1, b_1, a_2 および b_2 に1/Dという共通因子を吸収することによって更に簡略化することができる。

【0167】計算アルゴリズム

最初に、製造時に固定または正確に計測される数量から全体を構成され、明示的除算演算子に関する必要性(ま

【0160】

【数20】

(40)

満たされた後、次式(41a)ならびに(41b)を使用して用紙フレームにおけるナビゲーション機構変位が計算される：

$$\Delta r_{p1} = \{ \Delta x_{p1}, \Delta y_{p1} \} = \Delta u_1 \underline{u} + \Delta v_1 \underline{v} \quad (41a)$$

$$\Delta r_{p2} = \{ \Delta x_{p1}, \Delta y_{p2} \} = \Delta u_2 \underline{u} + \Delta v_2 \underline{v} \quad (41b)$$

但し、用紙基準フレームにおける単位ベクトル \underline{u} ならびに \underline{v} は、式(36a)～(36b)によって定義される。換言すれば、用紙フレームにおけるナビゲーション機構変位を与える方程式は、較正フレームにおける対応する公式と同じように見える。しかし、式(41a)ならびに(41b)においては、単位ベクトル \underline{u} ならびに \underline{v} は定数単位ベクトルではなく、用紙基準フレームにおいてそれらは式(36a)～(36b)に従ってスキャナ・ヘッドと共に並進および回転する。

【0165】次に、ナビゲーション機構の起点座標は、 Δr_{p1} ならびに Δr_{p2} に前のナビゲーション機構位置 r_{p1} ならびに r_{p2} をそれぞれ加算することによって次式(42a)～(42d)のように更新される：

にナビゲーション機構2からそれぞれ変位される。用紙フレームにおいて、CIS終端点の位置は次式(43a)ならびに(43b)によって与えられる：

$$r'_{c1} = r'_{p1} + a_1 \underline{u} + b_1 \underline{v} \quad (43a)$$

$$r'_{c2} = r'_{p2} + a_2 \underline{u} + b_2 \underline{v} \quad (43b)$$

但し、 $r'_{p1} = \{x'_{p1}\}$ 、 $r'_{p2} = \{x'_{p2}, y'_{p2}\}$ であり、 \underline{u} ならびに \underline{v} は、式(42a)ならびに(42b)を使用して以前に計算されたナビゲーション起点の更新された座標軸を使用して式(36a)ならびに(36b)によってそれぞれ与えられる。従って、

たは同様であるが1/Dによる除算の必要性)を排除する(ROMに記憶される)定数の最適化されたセットが定義される：

$$C_1 = (m_1 / D) \cos \theta_1 \quad C_2 = (m_2 / D) \cos \theta_2$$

$$S_1 = (m_1 / D) \sin \theta_1 \quad S_2 = (m_2 / D) \sin \theta_2$$

$$A_1 = a_1 / D \quad B_1 = b_1 / D$$

$$A_2 = a_2 / D \quad B_2 = b_2 / D$$

加えて、必要とされる算術演算の数を減らすことによって計算を単純化する4つの一時的変数が図49によって定義される。

【0168】最良のケースにおいては、 $S_1 = S_2 = 0$ および $A_1 = A_2 = 0$ であるように、従って、CISアレイが校正フレームにおけるナビゲーション機構起点に対してu方向に並進運動しないように、ナビゲーション機構光検出器アレイが完全に配列される。図49に示されるステップのシーケンスの検証および各ステップのために必要とされる2進算術演算の数の推定が、最悪および最良の両方のケースにおいて、以下の表1に示される結果を生む。これらの結果は、不良位置合せと並進運動を最小にするように製造プロセスを注意深く制御することによって、2進算術演算を30%以上減らすことができることを示している。いずれのケースにおいても、除算も乗算も必要とされず、(CIS終端点座標を計算する)第4のステップはオフラインで実施することができるので、リアルタイム・ナビゲーション経路再構築の計算コストは比較的小さい。

【0169】

【表1】

ステップ	最悪ケース			最良ケース		
	mul	add	sub	mul	add	sub
2	8	2	2	4	0	0
3	8	6	4	8	6	4
4	8	4	6	4	2	4
合計	24	12	12	16	8	8

【0170】ナビゲーション・プロセッサ80の出力86における位置タグ付きデータストリームは、まず、XおよびY両軸における連続性を与えるメモリ位置をイメージがうめることを可能にするイメージ空間に記憶される。従って、イメージの取得は、オリジナルの左上隅から右下隅への走査に制限されない。各イメージ・ピクセルが任意の開始位置からの相対的(X,Y)変位に関連づけ

られるので、イメージは、XおよびYにおいてイメージ・メモリの最大サイズに展開することができる。

【0171】イメージ形成センサ22は、走査装置がオリジナル上を移動するにつれ、刻時(クロック)される。刻時(クロック)動作は、センサの最も速く移動するエレメントがピクセル変位あたり少なくとも1回サンプルをとることを保証する。図6に関連して注記されたように、イメージ捕捉の間走査装置10が大きく曲がる場合、イメージ形成アレイの一方の端は他方の端より急速に並進運動し、そのため、相対的に速度の遅い方の端ではピクセルのサンプリングが過大となる。この状況は、イメージ空間における特定のピクセル位置において、(グレースケールの場合)最も最近の読み取りを記録することによるか、あるいは、(バイナリ・イメージの場合)論理ORモードで記録することによって、処理される。

【0172】次の動作は、位置タグを付けられた増分をマップする。1つの実施形態において、増分の端点は1つの線分によって結ばれる。イメージ形成センサ22の各ピクセルの距離は固定的であるので、その線分に対するピクセルの物理的位置を計算することができる。各ピクセルの物理的位置を決定する1つの手法は、Bresenhamマラスタ線手法の修正である。この修正において、イメージ形成センサにおけるピクセルのアレイは固定的であるので、線分ループも同じように固定的である。すなわち、通常のBresenhamアルゴリズムにおいては、線分ループにおける繰返し数は、 Δx ならびに Δy のいずれか大きい方、すなわち、 $\max(\Delta x, \Delta y)$ であるが、修正アルゴリズムの場合、ループがN回繰り返されるように、 $\max(\Delta x, \Delta y)$ が習慣的に使用される場合には、アレイに沿ったピクセルの数(N)が使用される。以下のプログラムはこのアルゴリズムを記述する。

【0173】

【表2】

```

/*****
修正Bresenham線描出アルゴリズムを使用してピクセル値のNエレメント・アレイ
の終端点の位置ペア (xa,ya)ならびに (xb,yb)を使用してget_pixel()にピクセル
値をロードする
*****/

```

```

delta_x=xb-xa;
delta_y=yb-ya;
inc_x=(delta_x>0)-(delta_x<0); /* 増分は+1または-1 */ inc_y=(delta_y>0)-(
delta_y<0);
delta_x *= inc_x; /* 絶対値を取り出す */
delta_y *= inc_y;
x=xa;
y=ya;
x_err = 0;
y_err = 0;

```

```

for (i=0; i<N; i++)
{get_pixel (i/2,x/2,y/2);
x_err+=delta_x;
y_err+=delta_y;
if (x_err>=N)
{-x_err=-N;
x+=inc_x;
}
If(Y_err>=N)
{y_err=-N;
y+=inc_y;}
}

```

【0174】このようにして、Nピクセルからなるイメージ形成センサの終端点であるラスタ上の2つの点(xa, ya)ならびに(xb, yb)を所与として、各ピクセルが読み取られるべき場所のラスタ上の点(x, y)を連続的に検出することがこのプログラムの目的である。これらの点は、終端点aならびにbを結ぶ直線に対する最良の近似を形成する。xとyの差を取り出す。aとbの間の距離の符号から、直線が横切る時xおよびyは増分または減分されるか決定する。2つのレジスタx_errならびにy_errをゼロにセットした上、x=xaならびにy=yaから始めて、ループを開始する。次に、(x, y)における値を読み取って、get_pixel()を使用してそれを出力ラスタに書く。線形イメージ・センサがナビゲーションの半分の解像度を持つとすれば、センサにおけるピクセル数および出力ラスタにおける位置に関してi/2、x/2、y/2を使用する。delta_xならびにdelta_yをそれぞれの誤差レジスタに加算して、次に、誤差レジスタがNを越えていないかどうか両方のレジスタを調べる。越えていれば、レジスタからNを減算して、その増分だけxまたはyを変更する。誤差レジスタがNを超えていなければ、引き続きxまたはyの現在値を使用する。ループはN回実行されるまでプロセスは続く。

【0175】次のステップは、オーバーラップしている領域の範囲内で連続イメージ走査帯を縫合することである。これは、累算されたナビゲーション誤差を識別および修正し、残存する誤差があればそれをマスクするように実行される。このマスク動作は白い背景上の黒い印刷の領域において実行できる。例えば、白い空間領域すなわち所与のしきい値以上の強度を持つ領域においてのみ縫合を行うことによって実行できる。(破棄されるべき)オーバーラップ領域の重複データの識別の方法およびナビゲーション誤差の測定および補正の方法を以下に記述する。

【0176】イメージ走査帯の縫合技法は、走査に関連する業界において既知のものである。これらの技法は、典型的には、一対の完全なイメージ帯を必要とし、2つの帯の位置を定める単一の大域変換を実行する。しかし、この場合、連続的ナビゲーション・データが縫合に

必要な位置決め情報を提供する。ナビゲーション信号が誤差を累算する傾向があるので、特徴オフセットの分析から導出される補正信号をフィードバックすることによってナビゲーション信号は連続的に修正される。

【0177】領域の範囲内の特徴を相関させることによってナビゲーション補正が計算されるので、2つのイメージ帯を縫合するためにはなんらかのオーバーラップ領域が必要である。図11に示されている状況を考察する。ここでは、走査帯#1が戻りの帯#2のパスによって再サンプルされている。時間Tにおいて、部分的帯が走査されている。図12は、このオーバーラップ領域108を強調表示している。図12に示されているように、帯#1の収集の間、帯の下側エッジに沿って、タグ110、112、114という位置の四辺形イメージ・セグメント(以下"位置決めタイル"と呼ぶ)が周期的にラベル付けされる。後のパス(帯#2)において、帯#1のタグ付き領域の上の余分なオーバーラップ領域108は、どこを刈り取るべきかを決定するナビゲーション情報を使用して刈り取られる。帯#2において各セグメント長が取得される毎に、"余分"が刈り取られた後、帯#1の位置決めタイルが、帯#2の残るべき領域の上部に配置される。

【0178】ナビゲーション・データが完全であれば、タグ#1の位置と帯#2の再走査されたタイルの位置の間にオフセットは存在しない。実際には、最後の位置決めが実行された以後なんらかのナビゲーション誤差が累算している。これら2つのタイルの間のオフセットは、総累算誤差を最小限にとどめるため、そのデータに関連する将来のナビゲーション位置・タグを更新するため使用される補正因子を生成する。このように、ナビゲーション・データにおける総累算誤差は、走査帯のオーバーラップ領域における明白なゆがみを派生させるような大きさに増大することを防止される。

【0179】帯#1および帯#2は単一のイメージを生成するように結合されるので、帯#2がオリジナルの位置合わせタイルの位置に来るまで、オリジナルの位置合わせタイルのコピーはバッファに一時的に保存される。この相関のため位置決めタイル全体を使用することがで

きるが、階調イメージの長方形タイル(例えば15×15ピクセル)から成る高周波数コントラストの小さい領域(すなわち"特徴")が、帯#1の位置合わせの範囲内に配置され、バッファに保存される。この特徴の位置が2度目に交差される場合、保存された特徴の位置と帯#2における同じ特徴の間のオフセットが、2つの特徴を一致させるために必要なナビゲーション補正信号を生成する。その他の相関手法を利用することもできるが、許容可能な手法は、"平方差の総和"相関である。特徴のオリジナルの位置の周囲に小さい検索領域が定義され、相関係数が次の式によって決定される。

【0180】

【数22】

$$C_{k,1} = \sum_i \sum_j (T_{i,j} - I_{i,k,j,1})^2$$

【0181】但し、 $T_{i,j}$ は帯#1からの特徴の階調値を示し、 $I_{i,k,j,1}$ は帯#2から新しく取得される特徴の階調値を示す。インデックス i 及び j は特徴の範囲内の位置を指定し、一方、インデックス k ならびに i は、(検索領域の範囲内に残るように制約される)並進運動オフセットの大きさを指定する。結果として得られる相関アレイの中の最小エレメントが2つの特徴の間のオフセットを示す。このボウル形結果の最小値を見出すため補間を使用してサブピクセルの位置的正確度が得られる。

【0182】自己相関法の正確度を改善するので、位置決めタイルの範囲内の特徴がイメージ分散を最大にするように選択される。1つの可能な実施形態において、領域の範囲内の位置のサブセットだけが考慮される。そのような位置116、118、120、122および124は、位置決めタイルの主軸126ならびに128(領域を定義する線分の対向する中点を結ぶ線分)に沿って位置するように、図13に示されている。これらの位置は、交点、および、交点と軸の中点の半分の位置、においてサンプルされている。位置116、118、120、122および124の各々に関して、次式を使用して偏差 $VAR_{k,1}$ が計算される。

【0183】

【数23】

$$SUM_{k,1} = \sum_i \sum_j I_{k,1,1,j}$$

$$SUM2_{k,1} = \sum_i \sum_j (I_{k,1,1,j})^2$$

$$VAR_{k,1} = SUM2_{k,1}/N - (SUM_{k,1})^2/N^2$$

【0184】最終的代表的イメージにおける明らかなひずみを防ぐため、誤差推定が徐々に適用される。すなわち、線形センサ・データの新しい行がメモリへロードされる毎に、誤差全体の精算が行われるまで、小さい固定の大きさのステップで"位置タグ"が修正される。

【0185】好ましい実施形態において、イメージ再構

築、縫合ならびにイメージ管理に関する処理エレクトロニクスが、図1の走査装置10を定義する格納容器の範囲内に収納される。このように、走査されたイメージはイメージ・ディスプレイ16に即刻提示されることができる。走査装置は、位置タグを付けられたイメージ・データを記憶するメモリを含むが、処理ならびにファイル管理エレクトロニクスおよびファームウェアを必ずしも必要としない。

【0186】図3を参照して注記したように、ナビゲーションならびにイメージ形成センサ22、24および26は、好ましくは、軸回転部材20上に装着される。1つの実施形態において、軸回転部材は、少なくとも1つの弾性材によって格納容器の剰余部分に接続される。この場合、弾性材の一端は格納容器の静止部に接続され、他方の端は軸回転部材に接続される。弾性材はちょうつがいのはたらきをする。このように、軸回転部分は、摩擦エレメントを使用せずに、"浮く"ことを可能にされる。電力制御およびデータ信号は、電磁干渉を最小にするようにシールドされた屈曲ケーブルを介してセンサへ導くことができる。軸回転部材を軸回転するように接続するその他の方法を使用することは可能である。軸回転部材が削除され、センサが格納容器の固定位置に取り付けられる場合、イメージ捕捉の間、走査装置を過度に傾けない配慮が必要である。この実施形態においては、照明ならびに光学エレメントの設計には十分な注意が払われなければならない。

【0187】以上本発明の特定の実施形態が提示および記述されたが、本発明の一層広範囲な局面において本発明の理念を逸脱することなく上記実施形態に種々の変更ならびに修正を加えることができる点は当業者に明らかであろう。例えば、手持ち型スキャナが記述されているが、本発明のナビゲーション方法は、手持ち型スキャナにあるいはスキャナにさえ制限されない。実際、本発明のナビゲーション方式は、ナビゲーション・ツールとしてセンサまたはその他の検出器を利用するいかなる装置にも適用することができる。

【0188】本発明には、例として次のような実施様態が含まれる。

(1)センサ・アレイのナビゲーション位置を取得する方法であって、上記センサ・アレイを介して基準フレームを取得するステップと、上記センサ・アレイを介してサンプル・フレームを取得するステップと、上記サンプル・フレームおよび上記基準フレーム両方の基準特徴の間の関係を表す相関データを生成するステップと、上記相関データに基づいて上記基準フレームに対する上記サンプル・フレームの基準特徴の相対的変位を決定するステップと、を含み、上記相対的変位を決定するため、一般的2次元テラレー級数展開式としてモデル化される相関データの相関表面の大域極値が使用される、ナビゲーション位置取得方法。

【0189】(2)上記一般的2次元テラレー級数展開式が2次式である、上記(1)に記載のナビゲーション位置取得方法。

(3)上記関連データが、更に、相関関数を使用して生成される複数の相関係数を含む、上記(1)に記載のナビゲーション位置取得方法。

(4)上記相関係数と上記2次元テラレー級数展開式の間の線形マッピングを適用するステップを更に含む、上記(3)に記載のナビゲーション位置取得方法。

(5)上記相関関数が1次関数である、上記(3)に記載のナビゲーション位置取得方法。

(6)上記相関関数が2次関数である、上記(3)に記載のナビゲーション位置取得方法。

(7)上記相関関数が3次関数である、上記(3)に記載のナビゲーション位置取得方法。

(8)基準特徴の相対的変位を決定する上記ステップが、上記2次元テラレー級数展開式の係数の値を決定するステップを含む、上記(1)に記載のナビゲーション位置取得方法。

【0190】(9)上記2次元テラレー級数展開式の係数を取得するため、相関データの統計的適合を計算するステップを含む、上記(8)に記載のナビゲーション位置取得方法。

(10)上記2次元テラレー級数展開式の係数の少なくとも1つが上記基準フレームを上記サンプル・フレームとして使用することによって生成される、上記(8)に記載のナビゲーション位置取得方法。

(11)基準特徴の相対的変位を決定する上記ステップが、2次元のテラレー級数展開式の係数の値に基づく変位のコンポーネントを決定するステップを含む、上記(1)に記載のナビゲーション位置取得方法。

(12)基準特徴の変位の精度推定が予測値の定義済みセットの範囲内にあるか否かを判断するステップを更に含む、上記(10)に記載のナビゲーション位置取得方法。

(13)サンプル・フレームと基準フレームの間の変位の生成された値に補正関数を適用するステップを更に含む、上記(10)に記載のナビゲーション位置取得方法。

【0191】(14)少なくとも1つのセンサ・アレイと、プロセッサと、該プロセッサを制御するコンピュータ・プログラムと、を備えるスキャナであって、該コンピュータ・プログラムが、上記センサ・アレイを介して基準フレームを取得するステップと、上記センサ・アレイを介してサンプル・フレームを取得するステップと、上記サンプル・フレームならびに上記基準フレーム両方の基準特徴の間の関係を表す相関データを生成するステップと、上記相関データに基づいて上記基準フレームに対する上記サンプル・フレームの基準特徴の相対的変位を決定するステップとを実行する複数の命令を含み、上記相対的変位を決定するため、一般的2次元テラレー級数展開式としてモデル化される相関データの相関表面の大域

極値が使用される、スキャナ。

【0192】(15)上記一般的2次元テラレー級数展開式が2次式である、上記(14)に記載のスキャナ。

(16)上記関連データが、更に、相関関数を使用して生成される複数の相関係数を含む、上記(14)に記載のスキャナ。

(17)上記コンピュータ・プログラムが、上記相関係数と上記2次元テラレー級数展開式の間の線形マッピングを適用するステップを実行する命令を更に含む、上記(16)に記載のスキャナ。

(18)上記相関関数が1次関数である、上記(16)に記載のスキャナ。

(19)上記相関関数が2次関数である、上記(16)に記載のスキャナ。

(20)上記相関関数が3次関数である、上記(16)に記載のスキャナ。

(21)基準特徴の相対的変位を決定する上記ステップが、上記2次元テラレー級数展開式の係数の値を決定するステップを含む、上記(14)に記載のスキャナ。

【0193】(22)上記2次元テラレー級数展開式の係数を取得するため、相関データの統計的適合を計算するステップを実行する命令を上記コンピュータ・プログラムが更に含む、上記(21)に記載のスキャナ。

(23)上記2次元テラレー級数展開式の係数の少なくとも1つが上記基準フレームを上記サンプル・フレームとして使用することによって生成される、上記(21)に記載のスキャナ。

(24)基準特徴の相対的変位を決定する上記ステップが、2次元のテラレー級数展開式の係数の値に基づく変位のコンポーネントを決定するステップを含む、上記(14)に記載のスキャナ。

(25)基準特徴の変位の精度推定が予測値の定義済みセットの範囲内にあるか否かを判断するステップを実行する命令を上記コンピュータ・プログラムが更に含む、上記(24)に記載のスキャナ。

(26)サンプル・フレームと基準フレームの間の変位の生成された値に補正関数を適用するステップを実行する命令を上記コンピュータ・プログラムが更に含む、上記(24)に記載のスキャナ。

【0194】

【発明の効果】本発明を走査装置に適用することによって、連続的時間間隔で走査装置のセンサ・アレイによって捕捉されるイメージ・フレームの間の比較に基づいてナビゲーション情報を得る効率的な方法が提供される。

【図面の簡単な説明】

【図1】オリジナル上のくねった経路をたどる手持ち型走査装置の外観図である。

【図2】図1の走査装置のイメージ形成ならびにナビゲーション・センサの裏面図である。

【図3】図1の走査装置をイメージ形成ならびにナビゲ

ーション・センサを露出させて示した外觀図である。

【図4】図3のナビゲーション・センサのうちの1つに関する照光システムのブロック図である。

【図5】図4の照光システムにおいて照光を行う発光ダイオードならびに光学エレメントを示すブロック図である。

【図6】図1の走査装置のイメージ捕捉の概念を示すブロック図である。

【図7】図1の走査装置のナビゲーション処理の1つの実施形態の動作の流れ図である。

【図8】図7の動作の一部の詳細を示すブロック図である。

【図9】図8のステップを実施するコンポーネントのブロック図である。

【図10】図9における出力を表す位置タグ付きデータストリームのブロック図である。

【図11】図12と共に、図1の走査装置による走査帯を表すブロック図である。

【図12】図11と共に、図1の走査装置による走査帯を表すブロック図である。

【図13】隣接走査帯を縫合するために利用される位置決めタイルを表すブロック図である。

【図14】センサ・アレイを通してイメージ形成された用紙繊維イメージ・セットを表わすブロック図である。

【図15】図14の用紙繊維イメージ・セットに"差の平方の和"相関関数を適用して計算された相関表面を表すブロック図である。

【図16】 z' 軸の周囲を角度 θ 回転し次にベクトル (x_0, y_0) 並進するという特別ケースにおける2Dアフィン変換を示すブロック図である。

【図17】最適最小2乗を図15において示されるデータに適合させた場合の相関表面を表すブロック図である。

【図18】 3×3 ナビゲーション機構ピクセル・シフト相関グリッドと関数 $f(x, y)$ の対応する値の間のマッピングを示すブロック図である。

【図19】2次式相関関数ならびに図14の用紙サンプルを使用して取得される相関数へのアルゴリズム"9A"の適用によって生じるナビゲーション誤差を表すブロック図である。

【図20】2次式相関関数ならびに図14のデータセットを使用して計算される真の相関表面と最適合致2次表面の間の相違を示すブロック図である。

【図21】2次式相関関数ならびに図14の用紙サンプルを使用して取得される相関数へのアルゴリズム"9B"の適用によって生じるナビゲーション誤差を表すブロック図である。

【図22】線形相関関数ならびに図14のデータセットを使用して計算される真の相関表面と最適合致2次表面の間の相違を示すブロック図である。

【図23】線形相関関数ならびに図14の用紙サンプルを使用して取得される相関数へのアルゴリズム"9B"の適用によって生じるナビゲーション誤差を表すブロック図である。

【図24】立方体相関関数ならびに図14のデータセットを使用して計算される真の相関表面と最適合致2次表面の間の相違を示すブロック図である。

【図25】立方体相関関数ならびに図14の用紙サンプルを使用して取得される相関数へのアルゴリズム"9B"の適用によって生じるナビゲーション誤差を表すブロック図である。

【図26】 $CC \rightarrow 3/2$ というマッピングの適用によって人為的に生成された相関データを再形成することによって改善された線形最小2乗法の2次関数へ適合を示すブロック図である。

【図27】最適合致2次モデル関数と真の相関表面の間の差を示すブロック図である。

【図28】相関関数を図21に示された対応する位置推定値 (x_0, y_0) 各々に適用した結果を表すブロック図である。

【図29】最適線形補正の後の図21のナビゲーション誤差を表すブロック図である。

【図30】最適線形補正の後の図19のナビゲーション誤差を表すブロック図である。

【図31】ほぼ $(0.5$ ピクセル, 0.5 ピクセル)変位した相関表面の輪郭を示すブロック図である。

【図32】6セルならびに4セルそれぞれのケースに関する関数値への相関係数のマッピングを示すブロック図である。

【図33】25セル・グリッドにおける"最小セル"予測値を使用した場合の、2次式相関関数ならびに図14の用紙サンプルを使用して取得される相関数へのアルゴリズム"9B"の適用によって生じるナビゲーション誤差を表すブロック図である。

【図34】シミュレートされた位置情報と予測値 $x_{4,2}$ の対応する出力の比較を示すブロック図である。

【図35】シミュレートされた位置情報と2つの8タップ予測値の対応する出力の比較を示すブロック図である。

【図36】単一ナビゲーション位置測定における統計誤差の標準偏差に対する予測値 $x_{m,n}$ または $y_{m,n}$ における統計的不確実性の比率を示すブロック図である。

【図37】シミュレートされた位置情報と2つの1予測値の対応する出力の比較を示すブロック図である。

【図38】シミュレートされた位置情報と円滑子 $X_{4,2}$ の対応する出力の比較を示すブロック図である。

【図39】シミュレートされた位置情報と2つの17タップ円滑子の対応する出力の比較を示すブロック図である。

【図40】単一ナビゲーション位置測定における統計誤

差の標準偏差に対する円滑化された値における不確実性の比率を示すブロック図である。

【図41】シミュレートされた位置情報と2つの定数円滑子の対応する出力の比較を示すブロック図である。

【図42】図43と共に、関数値に対する相関係数の6セル・マッピングを示すブロック図である。

【図43】図44と共に、関数値に対する相関係数の6セル・マッピングを示すブロック図である。

【図44】4つの6セル・サブアレイに関する減少された2次ナビゲーション・アルゴリズムを実施する公式を示すブロック図である。

【図45】校正基準フレームに組み込まれた2つのナビゲーション機構座標系のブロック図である。

【図46】校正ならびに用紙座標系の比較を示すブロック図である。

【図47】ナビゲーション機構光検出器アレイ起点の座標を使用する用紙繊維における校正基準ベクトル・コンポーネントの幾何学計算を示すブロック図である。

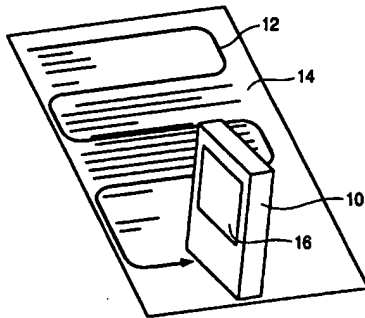
【図48】校正フレームにおける2つのナビゲーション機構の並進運動を示すブロック図である。

【図49】最悪ケース・ナビゲーション経路再構築アルゴリズムの実施に必要な公式のシーケンスの流れ図である。

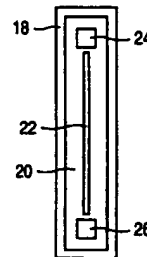
【符号の説明】

- 22 イメージ形成センサ
- 24 ナビゲーション・センサ
- 62 基準フレーム
- 66 サンプル・フレーム
- 64 固有の構造的特徴

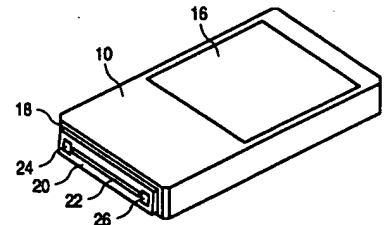
【図1】



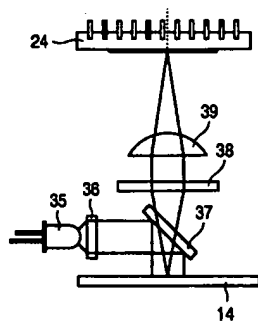
【図2】



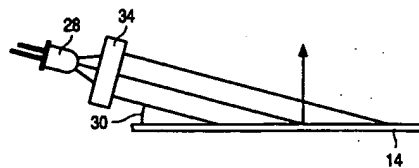
【図3】



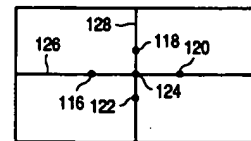
【図4】



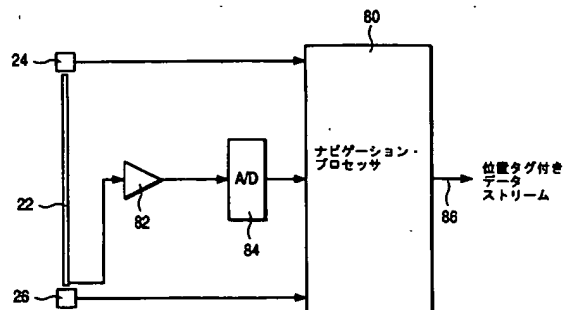
【図5】



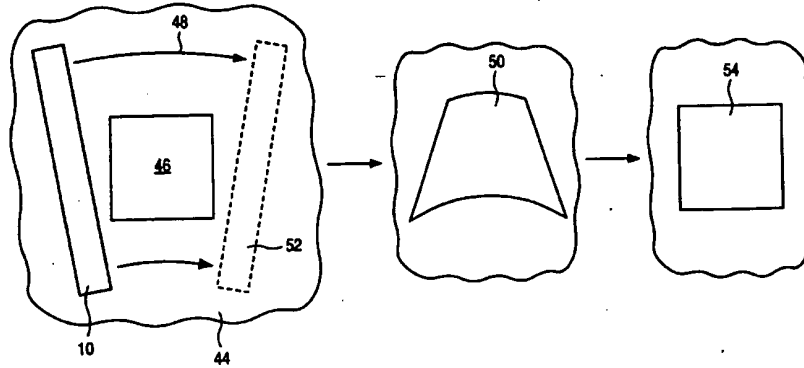
【図13】



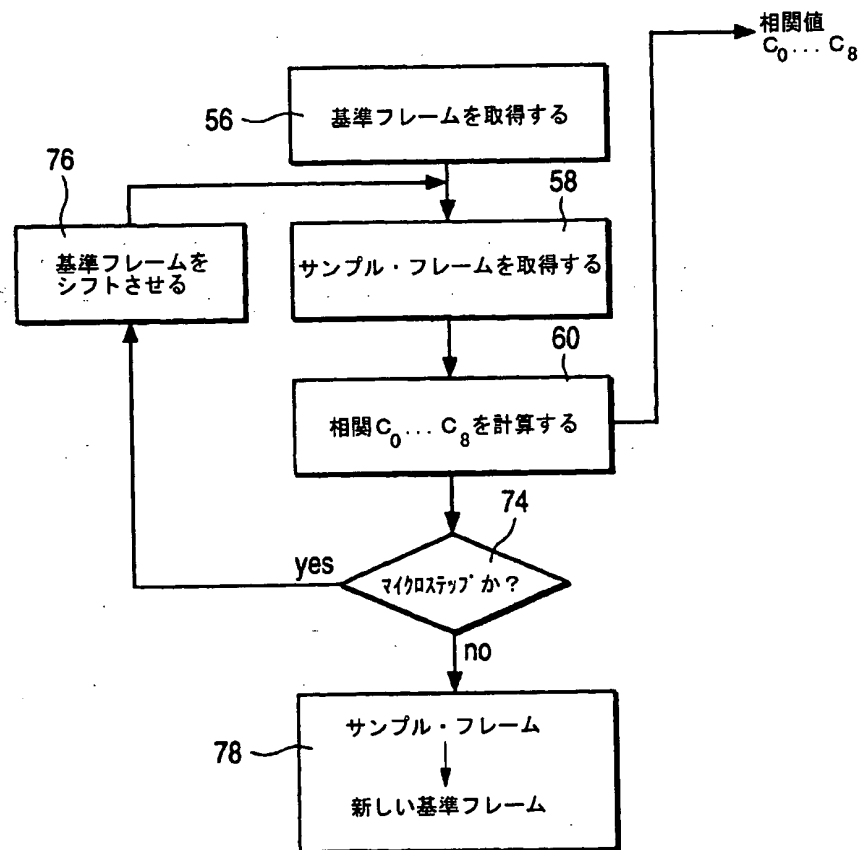
【図9】



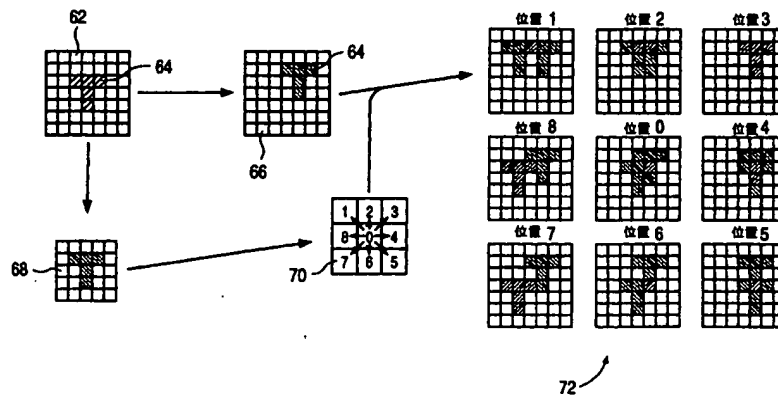
【図6】



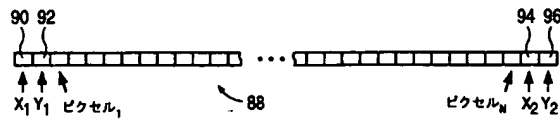
【図7】



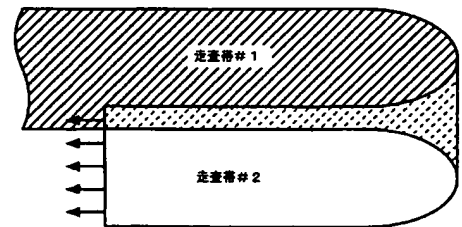
【図8】



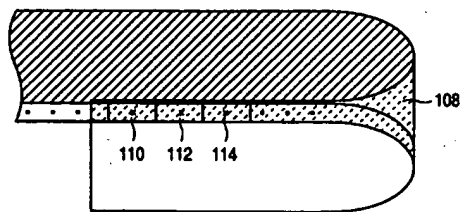
【図10】



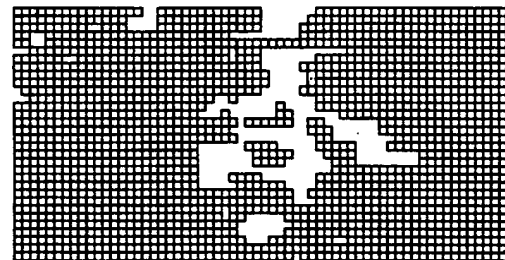
【図11】



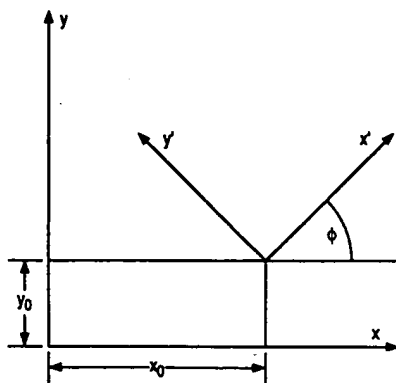
【図12】



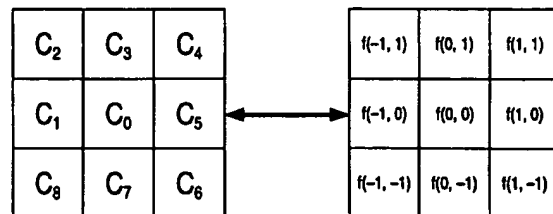
【図14】



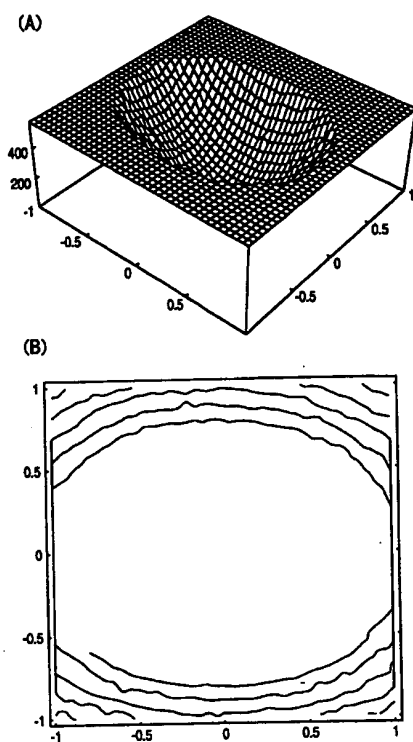
【図16】



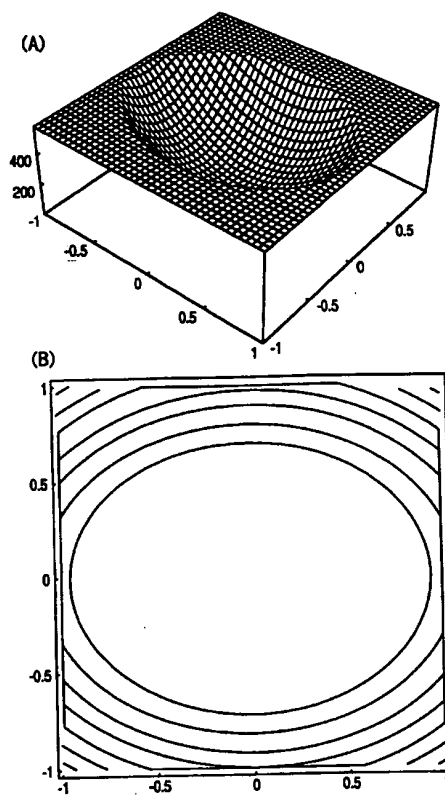
【図18】



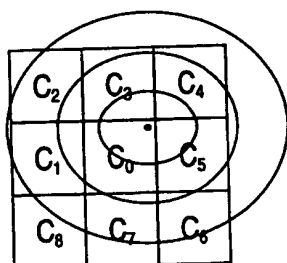
【図15】



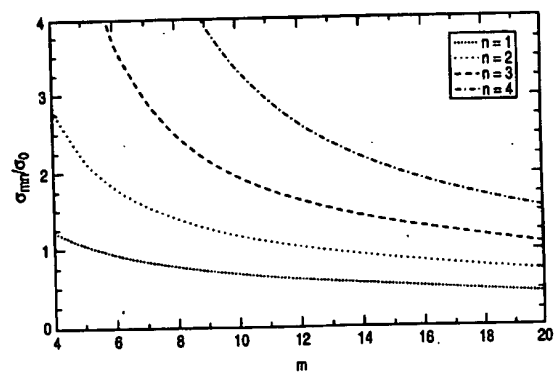
【図17】



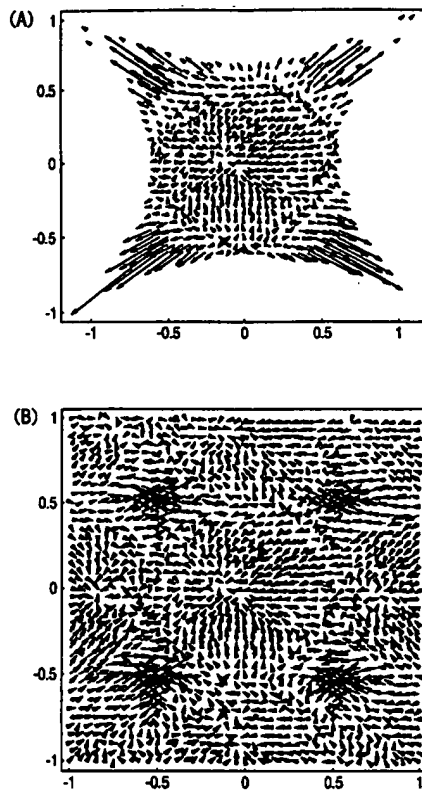
【図31】



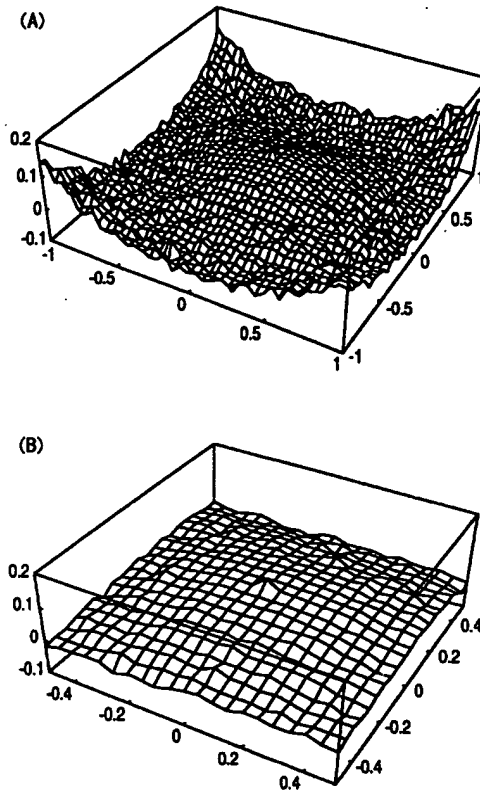
【図36】



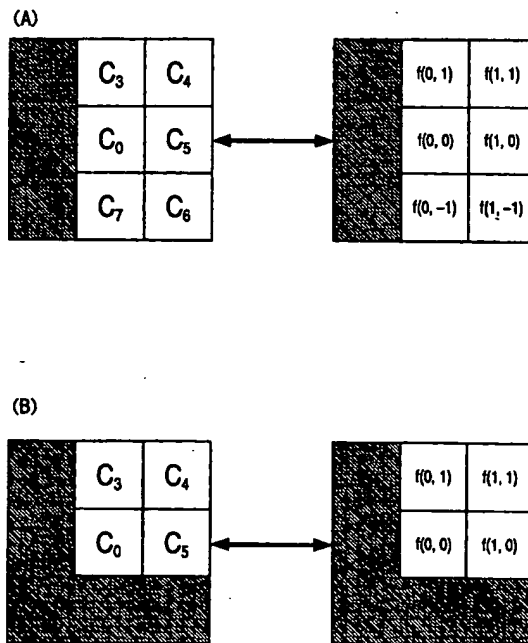
【図19】



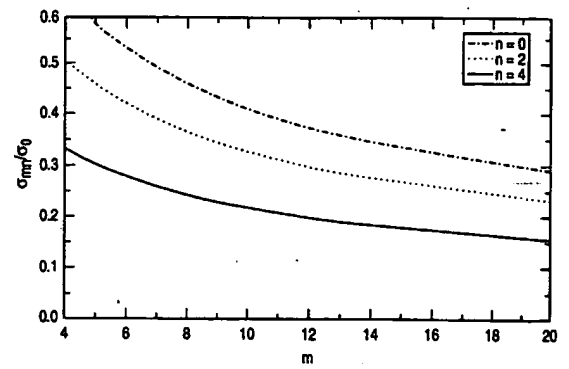
【図20】



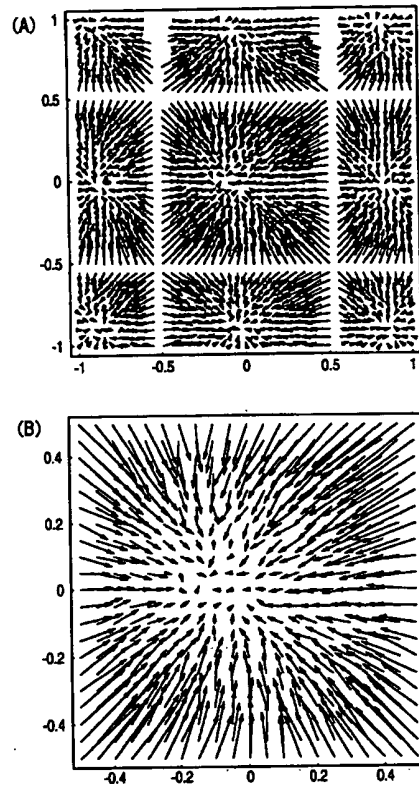
【図32】



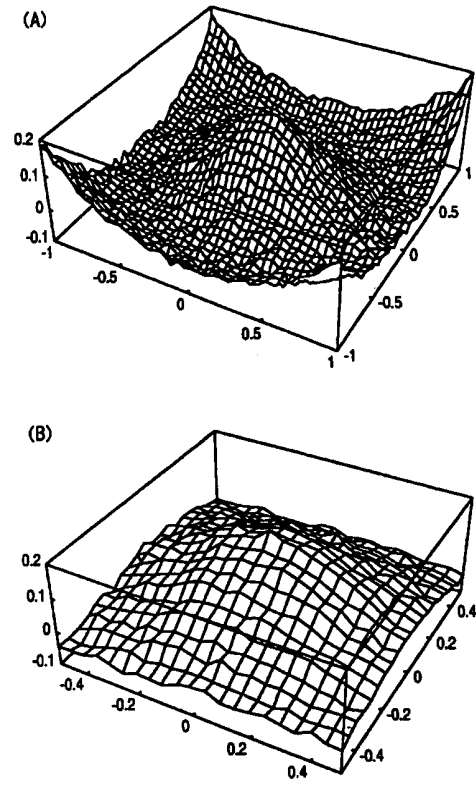
【図40】



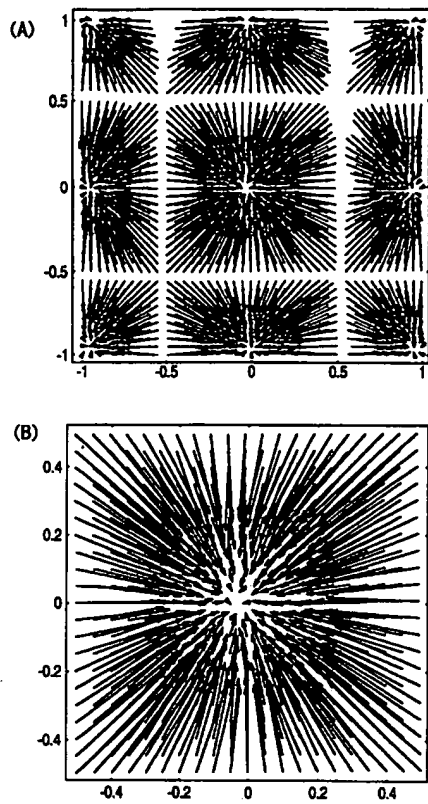
【図21】



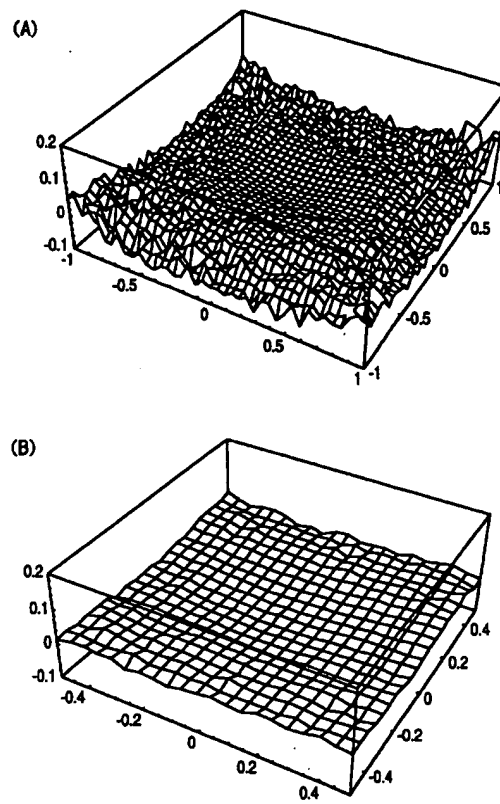
【図22】



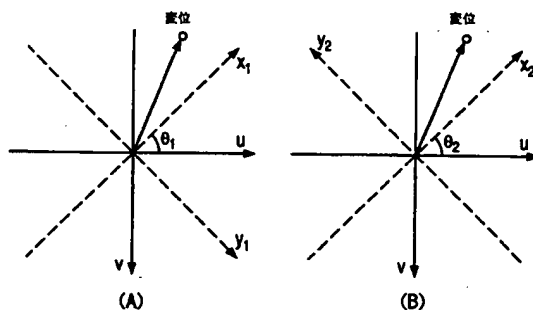
【図23】



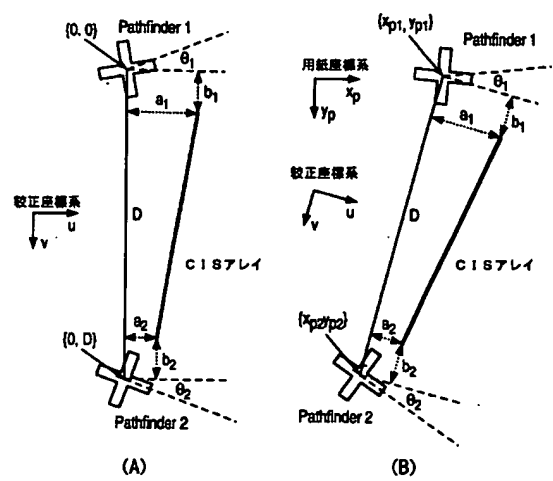
【図24】



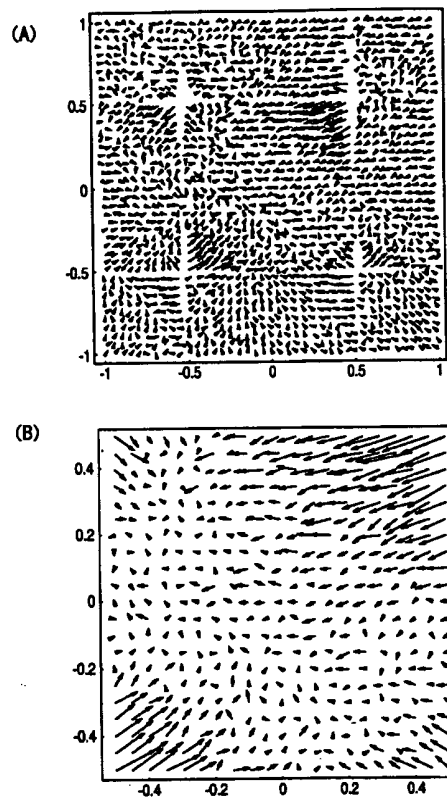
【図45】



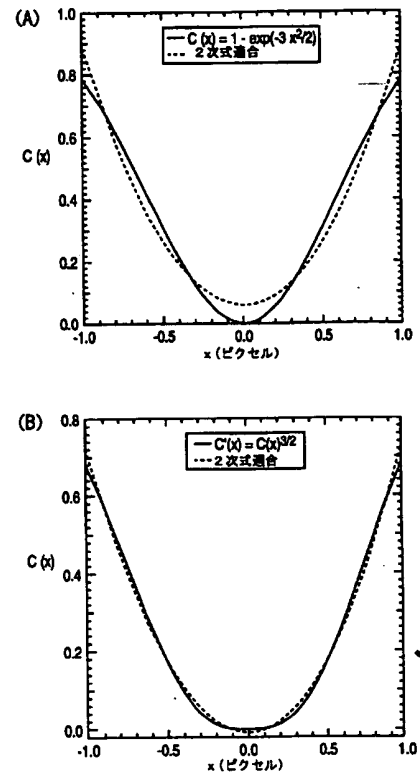
【図46】



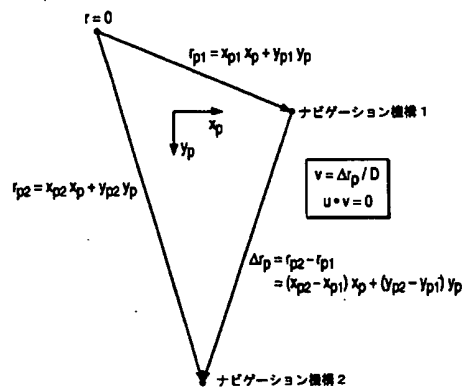
【図25】



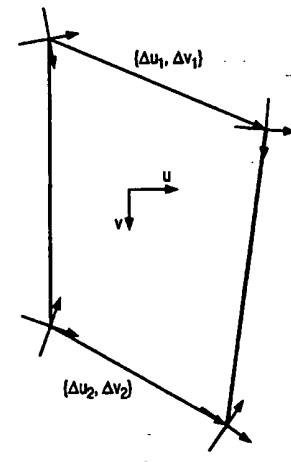
【図26】



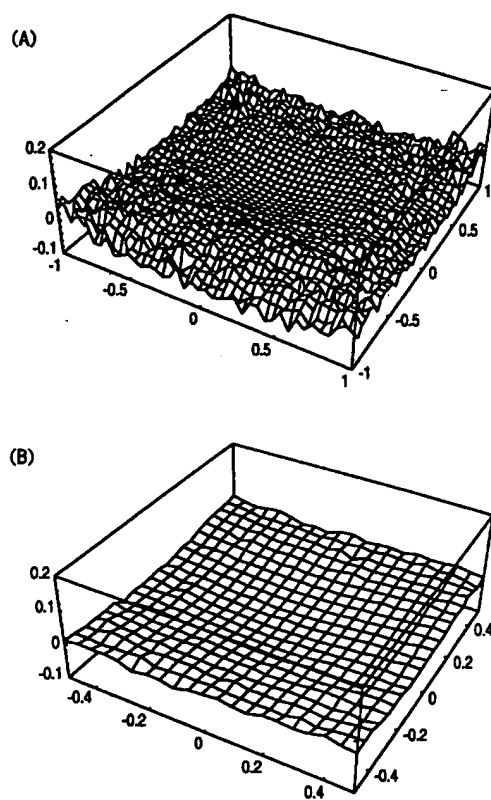
【図47】



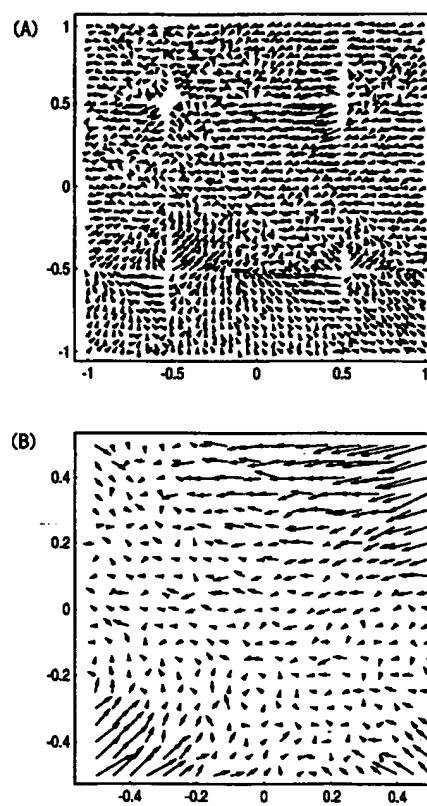
【図48】



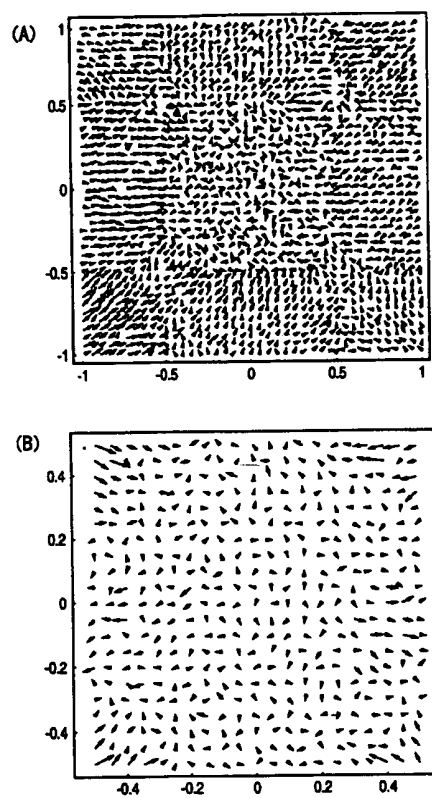
【図27】



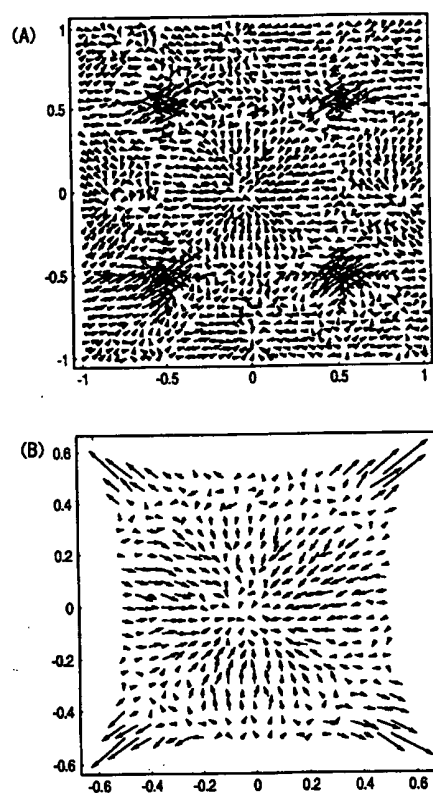
【図28】



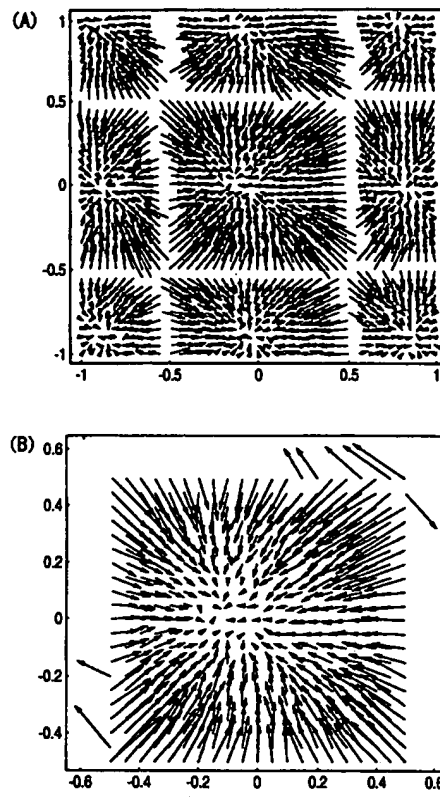
【図29】



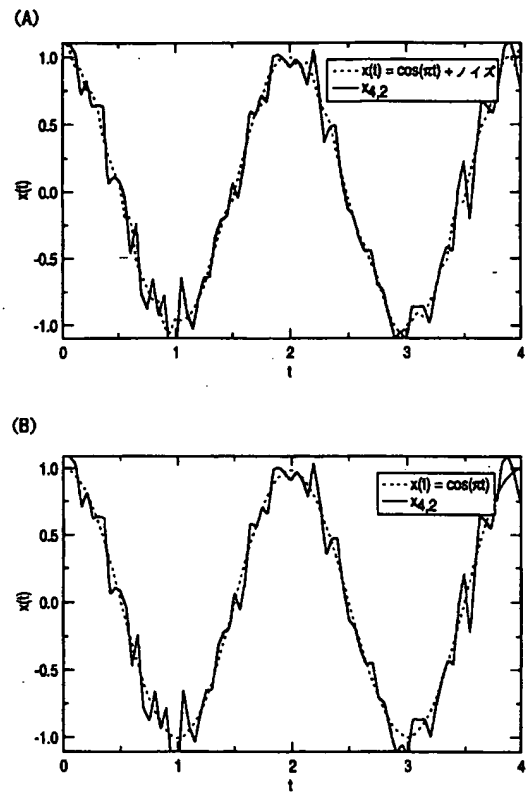
【図30】



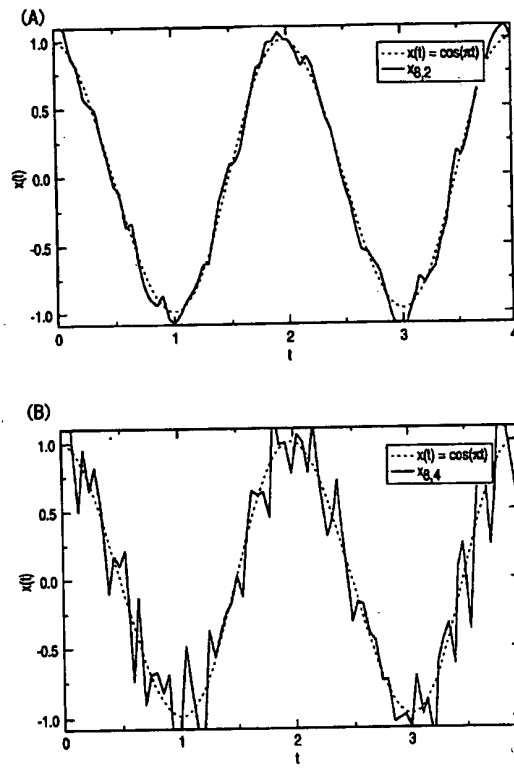
【図33】



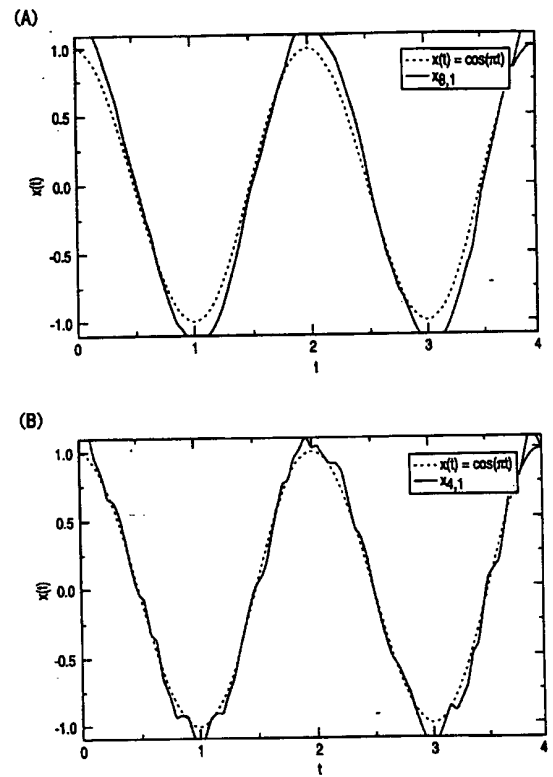
【図34】



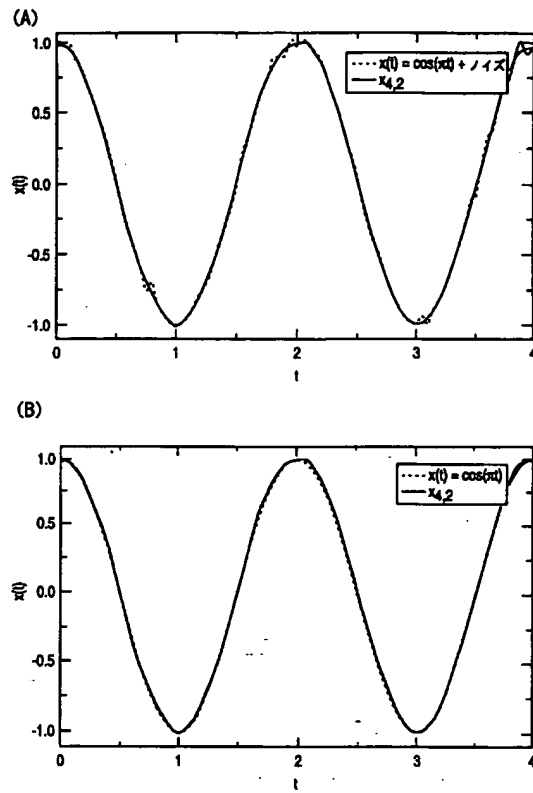
【図35】



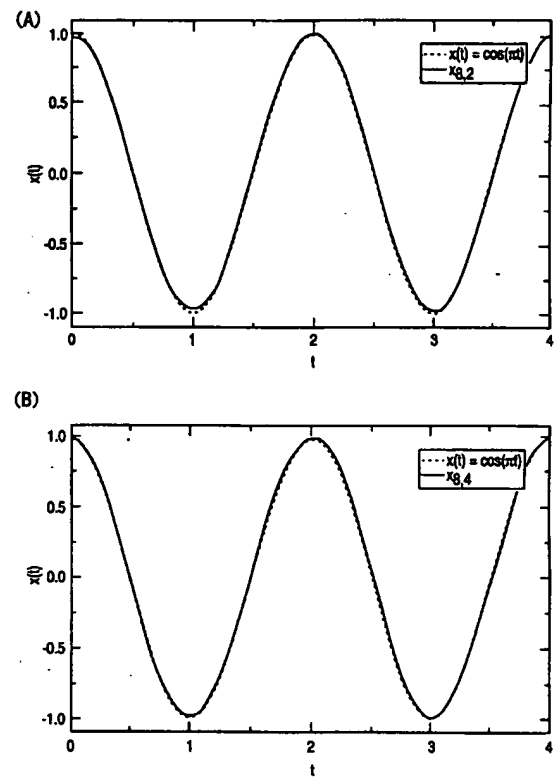
【図37】



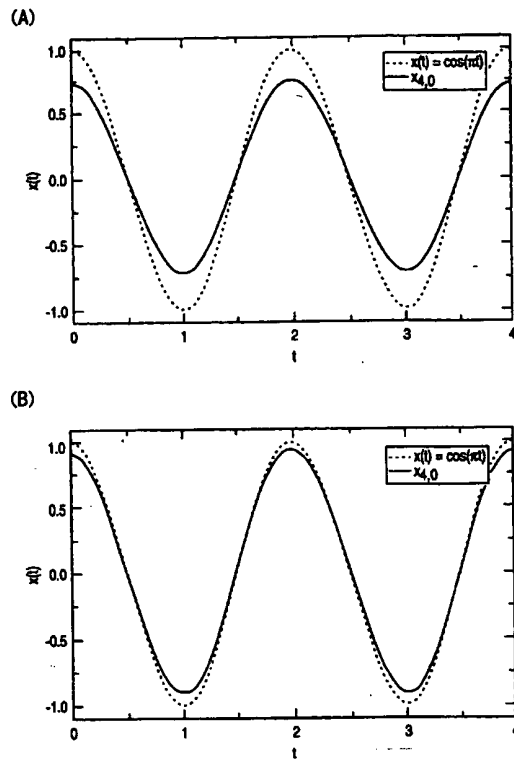
【図38】



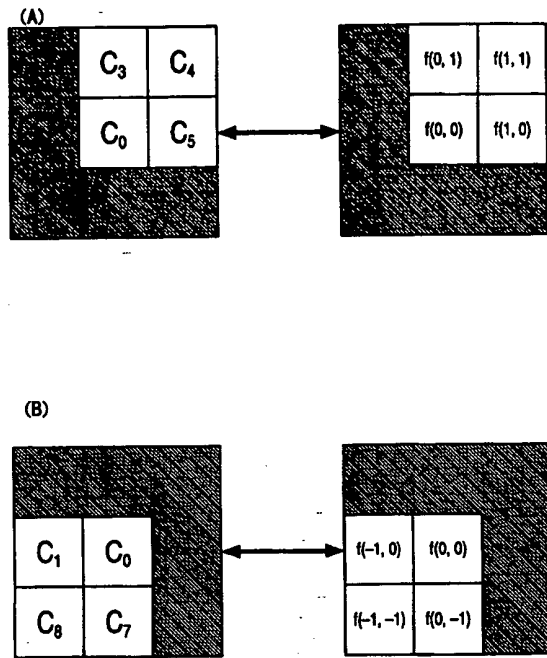
【図39】



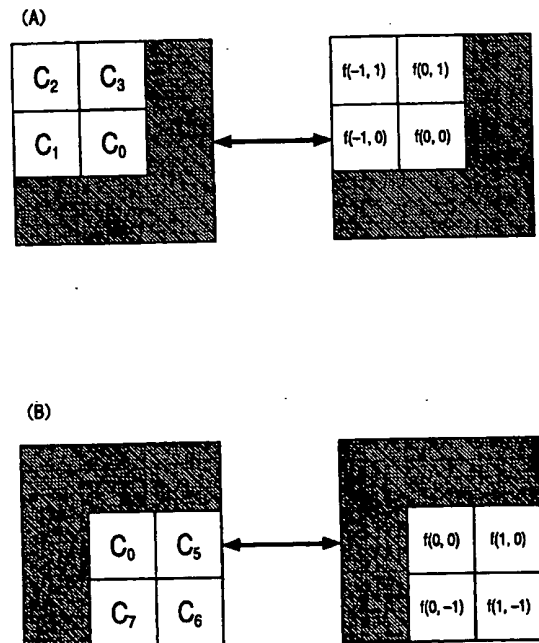
【図41】



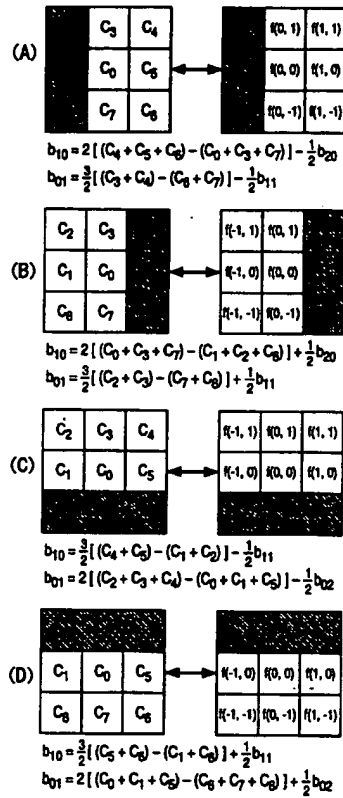
【図42】



【図43】



【図44】



【図49】

ナビゲーション経路再構築アルゴリズム

1. ROM記憶定数を定義する

$$C_1 = \frac{m_1}{D} \cos \theta_1 \quad C_2 = \frac{m_2}{D} \cos \theta_2$$

$$S_1 = \frac{m_1}{D} \sin \theta_1 \quad S_2 = \frac{m_2}{D} \sin \theta_2$$

$$A_1 = \frac{a_1}{D} \quad B_1 = \frac{b_1}{D}$$

$$A_2 = \frac{a_2}{D} \quad B_2 = \frac{b_2}{D}$$

2. ナビゲーション機構変位を校正フレームに変換する

$$\Delta u_1 = C_1 \Delta x_1 + S_1 \Delta y_1$$

$$\Delta v_1 = C_1 \Delta y_1 + S_1 \Delta x_1$$

$$\Delta u_2 = C_2 \Delta x_2 + S_2 \Delta y_2$$

$$\Delta v_2 = C_2 \Delta y_2 + S_2 \Delta x_2$$

3. 用紙フレームにおけるナビゲーション機構位置を更新する

$c_p = y_{p2} - y_{p1}$ および $s_p = x_{p2} - x_{p1}$ を定義して、次に以下を計算する

$$x_{p1} = x_{p1} + \Delta u_1 c_p + \Delta v_1 s_p$$

$$y_{p1} = y_{p1} - \Delta u_1 s_p + \Delta v_1 c_p$$

$$x_{p2} = x_{p2} + \Delta u_2 c_p + \Delta v_2 s_p$$

$$y_{p2} = y_{p2} - \Delta u_2 s_p + \Delta v_2 c_p$$

4. 用紙フレームにおけるC1S端点位置を計算する

$c_p = y_{p2} - y_{p1}$ および $s_p = x_{p2} - x_{p1}$ を定義して、次に以下を計算する

$$x_{c1} = x_{p1} + A_1 c_p + B_1 s_p$$

$$y_{p1} = y_{p1} - A_1 s_p + B_1 c_p$$

$$x_{p2} = x_{p2} + A_2 c_p - B_2 s_p$$

$$y_{p2} = y_{p2} - A_2 s_p - B_2 c_p$$

フロントページの続き

(72)発明者 ロス・アール・アレン

アメリカ合衆国94002カリフォルニア州ベ

ルモント、ヘインライン・ドライブ 408

THIS PAGE BLANK (USPTO)